

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALAT
YÖNTEMİNDE BAĞLAYICI REÇİNE ÇEŞİTLERİNİN SS316L METAL
TOZUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mert GÜRGEN

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



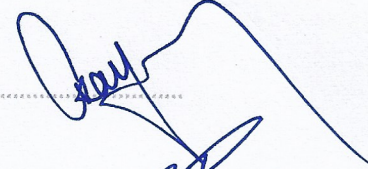
© 2019 [Mert GÜRGEN]

TEZ ONAYI

Mert GÜRGEN tarafından hazırlanan "**Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat Yönteminde Bağlayıcı Reçine Çeşitlerinin SS316L Metal Tozuna Etkisinin Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

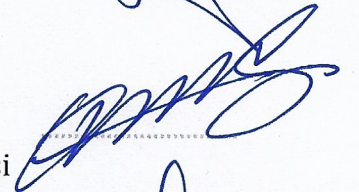
Danışman

Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN
Süleyman Demirel Üniversitesi



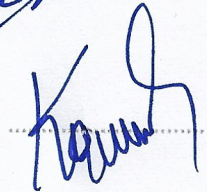
Jüri Üyesi

Doç. Dr. Gültekin BASMACI
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Kamil DELİKANLI
Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR



TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mert GÜRGEN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Eklemeli İmalatın Sınıflandırılması	2
1.1.1. Fotopolimerizasyon.....	3
1.1.1.1. Stereolitografi.....	3
1.1.1.2. Dijital ışık işleme	4
1.1.1.3. Sürekli dijital ışık işleme	4
1.1.2. Malzeme Ekstrüzyon.....	4
1.1.2.1. Ergiyik biriktirme modelleme	4
1.1.3. Malzeme Püskürtme.....	5
1.1.3.1. Malzeme püskürtme	5
1.1.3.2. Nano partikül püskürtme.....	5
1.1.3.3. İstek üzerine bırakma.....	5
1.1.4. Toz Yataklı Ergitme	6
1.1.4.1. Multijet eritme.....	6
1.1.4.2. Seçici lazer ergitme.....	6
1.1.4.3. Elektron ışıkla ergitme.....	7
1.1.5. Levha/Sac Laminasyon Metodu.....	7
1.1.5.1. Tabakalı obje imalatı.....	7
1.1.6. Direk Enerji Depolama	8
1.1.7. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat.....	8
1.1.7.1. Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat.....	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ	11
2.1. Toz Ham Madde.....	11
2.2. Bağlayıcılar	12
2.3. Toz Ham Madde-Bağlayıcı Karışım Oranı	15
2.4. Islatabilirlik.....	16
2.5. Reçine Piroliz Durumları	16
2.6. Sinterleme	18
3. MATERYAL ve METOT	23
3.1. Materyal	23
3.1.1. 316L toz ham madde.....	23
3.1.2. Bağlayıcı reçine	24
3.1.2.1. Fotopolimer reçine	25
3.1.2.2. İzopropil alkol	25
3.1.2.3. Para tolüen sülfonik asit.....	25
3.1.2.4. Furfuril alkol	26
3.1.3. Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat prototip cihazı	26
3.1.4. Uv kurlama aparatı	27
3.1.5. Kurlama fırını.....	28

3.1.6. Helyum piknometresi	28
3.1.7. Sinterleme fırını	29
3.1.8. Hassas kesme cihazı	30
3.1.9. Sıcak bakalit alma cihazı	30
3.1.10. Zımparalama cihazı	31
3.1.11. Mikrosertlik ölçüm cihazı	32
3.1.12. Basma deney cihazı	32
3.1.13. Çeker ocak	33
3.1.14. Optik mikroskop	34
3.1.15. Taramalı elektron mikroskobu	34
3.1.16. ImageJ programı	35
3.2. Metot	35
3.2.1. Tozların hazırlanması	36
3.2.2. Katı + sıvı kürlenmiş reçinelerle numune imalatı	36
3.2.3. Reçinenin hazırlanması	37
3.2.4. Fotopolimer reçineli numune imalatı	37
3.2.5. Sıcaklık kürlenmesi	38
3.2.6. Ham parça yoğunluk oranı ölçümü	38
3.2.7. Sinterleme	38
3.2.8. Numunelerin mikrosertlik ve mikro içyapı için hazırlanması	41
3.2.9. Mikrosertlik ölçümü	41
3.2.10. Basma dayanımı	41
3.2.11. Dağlama	41
3.2.12. Mikro içyapı incelemesi	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	43
4.1. Ham Yoğunluk Oranı	43
4.2. Yoğunluk Oranı	45
4.3. Basma Dayanımı	48
4.4. Mikrosertlik	50
4.5. Mikro İçyapı	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	65

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE BAĞLAYICI REÇİNE ÇEŞİTLERİNİN SS316L METAL TOZUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mert GÜRGEN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat yakın zamanda ortaya çıkmış ve hala gelişmekte olan bir eklemeli imalat yöntemidir. Gelişme aşamasında olmasından dolayı net bir bağlayıcı türü, oranı, sinterleme süreci ve ortamı belirlenememiştir. Bu çalışmada Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat yöntemi ile imal edilmiş eklemeli imalat parçalarında, bağlayıcı reçine çeşitlerinin etkisi incelenmiştir. İmalat için ham madde olarak SS316L metal tozu, bağlayıcı olarak ultraviyole ışıkla ve katı+sıvı reaktiflerle kürlenmiş reçineler kullanılmıştır. Katı+sıvı kürlenmiş reçine olarak furfuril alkol sıvı reçine, para tolüen sülfonik asit katı katalizör olarak seçilmiştir. Ultraviyole ışıkla kürlenmiş reçine izopropil alkol ile seyreltilmiştir. Reçine çeşitlerinin etkisinin yanı sıra; sinterleme sıcaklığı, katman kalınlığı ve bağlayıcı oranının etkileri de incelenmiştir. Adı geçen etkilerin incelenmesi açısından; basma dayanımı, mikrosertlik, ham ve sinterlenmiş yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca optik ve taramalı elektron mikroskopuyla yapılan incelemelerle kompozisyon oranları ve numunelerin kırınım desenlerinin analizleri de yapılmıştır. Farklı parametrelerin incelenmesi bakımından; 2 farklı reçine türü, 4 farklı reçine yoğunluğu, 3 farklı sinterleme sıcaklığı ve 3 farklı katman kalınlığı değerleri ile imalatlar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat, bağlayıcı, reçine, eklemeli imalat, 316L paslanmaz çelik, 3B yazıcı, toz metalürjisi, sinterleme, piroliz

2019, 65 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF EFFECT OF BINDER RESIN TYPES ON SS316L POWDER IN BINDER JETTING METAL ADDITIVE MANUFACTURING

Mert GÜRGEN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Construction and Manufacturing Department**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

Metal Binder Jetting is a recently developed and still developing an additive manufacturing method. Binder type, binder ratio, sintering process and atmosphere couldn't be determined due to its development stage. In this study, effect of binder resin types was investigated on additive manufacturing parts which manufactured by Binder Jetting Metal Additive Manufacturing. SS316L metal powder used as a raw material, ultraviolet curing and solid+fluid reactive curing resins used as binder. For solid+liquid curing resin, furfuryl alcohol was selected as liquid binder, para toluene sulfonic acid was selected as solid catalyst. The ultraviolet light cured resin was diluted with isopropyl alcohol. Besides effects of binder resin types, sintering temperature, layer thickness and binder ratio were investigated. In terms of examining the said effects; compressive strength, microhardness, green and sintered density were made. In addition, the microstructure analysis and the composition ratios obtained by scanning electron microscopy and diffraction patterns of the samples were analyzed. In terms of examination of different parameters; 2 different resin types, 4 different resin ratios, 3 different sintering temperatures and 3 different layer thickness values were used.

Keywords: Metal binder jetting, binder, resin, additive manufacturing, SS316L, 3D printing, powder metallurgy, sintering, pyrolysis

2019, 65 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Literatür araştırmalarım ve deneysel çalışmalarım da yardımcı olan Yusuf Sacid BARDAKÇI, Arş. Gör. Mevlüt Yunus KAYACAN ve Özden KOR'a, Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Eklemeli İmalat Ekibi'nden; Arş. Gör. Mehmet Alper DEMİRAY, Arş. Gör. Fehmi MUTLU, Osman SALTİK ve Öğr. Gör. Bahri ŞEKERCİ'ye, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanları Öğr. Gör. Hasan ISPARTALI ve Hikmet DEMİRAY'a teşekkürlerimi sunarım.

FYL-2018-6709 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığına teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme ve Melike KELEŞ'e sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mert GÜRGEN
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Eklemeli İmalat İşlem Basamakları	2
Şekil 1.2. Eklemeli imalatın sınıflandırılması	3
Şekil 2.1. p-TSA TGA Analizi	17
Şekil 2.2. SLA Reçine TGA Analizi	17
Şekil 2.3. FA TGA Analizi	17
Şekil 2.4. Alkid, Furan, Sodyum Silikat, Exone ve Fenolik Reçine TGA Analizi.....	18
Şekil 3.1. Çalışmada yapılan 316L kırınım deseni	23
Şekil 3.2. Literatürden 316L kırınım deseni	24
Şekil 3.3. BPMEİ Prototip Cihazı	27
Şekil 3.4. UV Lamba.....	27
Şekil 3.5. Kürleme İşleminin Yapıldığı Isıl İşlem Fırını	28
Şekil 3.6. Helyum Piknometresi	29
Şekil 3.7. Sinterleme İşleminin Yapıldığı Atmosfer Kontrollü Fırın.....	29
Şekil 3.8. Hassas Kesme Cihazı	30
Şekil 3.9. Sıcak Bakalite alma Cihazı.....	31
Şekil 3.10. Zımparalama Cihazı	31
Şekil 3.11. Mikrosertlik Ölçüm Cihazı.....	32
Şekil 3.12. Basma Deney Cihazı.....	33
Şekil 3.13. Çeker Ocak.....	33
Şekil 3.14. Optik Mikroskop.....	34
Şekil 3.15. Taramalı Elektron Mikroskopu	35
Şekil 3.16. Tez Kapsamında İzlenen Yol Haritası	36
Şekil 3.17. İmal edilen numenin tasarımı.....	37
Şekil 3.18. Sinterleme Fırın Süreci	40
Şekil 4.1. Ham Yoğunluk / Katman Yüksekliği Grafiği	43
Şekil 4.2. Yoğunluk/Reçine Oranı Grafiği.....	46
Şekil 4.3. Yoğunluk/Katman Kalınlığı Grafiği	47
Şekil 4.4. Basma Dayanımı/Parametreler Grafiği	49
Şekil 4.5. Mikrosertlik/Katman Kalınlığı Grafiği	51
Şekil 4.6. Toz Tanesi, Sinterleme Boyunları ve İri Taneli Yapılar	52
Şekil 4.7. Makro/Mikro Gözenekler ve Ferrit/Östenit Yapıları	53
Şekil 4.8. 316L Östenit ve Ferrit Yapıları.....	53
Şekil 4.9. Sinter Boyunları ve Reçine Kalıntıları	54
Şekil 4.10. (a)1100, (b)1150, (c)1200°C sinterlenen numuneler	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Metal Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Özellikleri	10
Çizelge 2.1. Kum Kalıp Yapımında Kullanılan Reçineler ve Katalizörleri	15
Çizelge 2.2. BPMEİ’de Etkin Parametrelerin Literatürdeki Yeri	21
Çizelge 3.1. Literatür ve Analiz Sonucu 316L Malzeme Oranları	24
Çizelge 3.2. IPA Kimyasal Özellikleri.....	25
Çizelge 3.3. p-TSA Kimyasal Özellikleri.....	26
Çizelge 3.4. FA kimyasal özellikleri.....	26
Çizelge 3.5. Dağlama Çözeltisi İçerikleri	42
Çizelge 4.1. Numunelerin Ham Mukavemet İçin Yoğunluk Oranları	45
Çizelge 4.2. Sinterlenmiş Numuneler İçin Yoğunluk Oranları.....	48
Çizelge 4.3. Basma Dayanımı Değerleri.....	50
Çizelge 4.4. Mikrosertlik Değerleri	51
Çizelge 4.5. Ortalama Tane Boyutu ve Çatlak Durumu	55
Çizelge 4.6. SLA ve FA+p-TSA’lı numunelerin kompozisyon oranları.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
BPMEİ	Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat
C	Karbon
cm	santimetre
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
Eİ	Eklemeli İmalat
FA	Furfuril Alkol
Fe	Demir
İPA	İzo Propil Alkol
mm	milimetre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Azot
Ni	Nikel
O ₂	Oksijen
P	Fosfor
p-TSA	Para Toluen Sülfonik Asit
S	Kükürt
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
SLA	Sterolografi
SS	Paslanmaz çelik
Ti	Titanyum
WC	Wolfram Karbür
XRD	X-Ray Kırınım Analizi
µm	mikrometre

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle geleneksel imalat yöntemleriyle imal edilemeyen parçalar için alternatif yollar aranmaya başlanmıştır. Bu geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden biri de Eklemeli İmalat'tır. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing), geleneksel imalat yöntemlerinin aksine imal edilecek parçanın daha kaba bir ham maddeden eksilterek ya da kütsel şekillendirmeye çalışmaz. Uygun şekilde yapılmış bir tasarıma göre toz veya ergiyik ham maddesinden kesit alanların katmanlar halinde imal eden bir sistemdir (Yalçın ve Ergene, 2017). Malzeme türüne, katmanların birleştirilme şekline ve birleştirici enerji kaynağına göre alt türlere ayrılarak, arzu edildiği şekilde parçanın imal edildiği üretim yöntemi olarak tanımlanabilmektedir. Şimdiye kadar hızlı prototipleme ve 3 boyutlu yazıcı gibi isimler alan bu teknoloji, günümüzde literatürde genel adıyla Eklemeli İmalat (Eİ) olarak kullanılmaktadır.

Eİ teknolojileri XX. yüzyılın son yarısından itibaren hızlı prototipleme sistemleri olarak öne çıkmaya başlamış, günümüze kadar da büyük gelişme göstermiştir. Eİ yöntemlerinde, dijital bir tasarım dosyasından yola çıkılarak, tasarlanan modelin kesit alanları katmanlar halinde birbiri üzerine eklenerek parça imal edilmektedir. İmalata dair herhangi bir kısıtlamayı düşünmeksizin tasarım yapılabilmesi ve böylelikle karmaşık parçalar oluşturulabilmesi, en az atık malzeme, kesici takım ve kesme kuvvetlerinin olmaması en önemli avantajlarıdır. Eİ'de, tasarımı yapılmış 3B dijital katı model, doğrudan Eİ cihazına gönderilmemektedir. Model ilk olarak, Eİ standart arabirimi olan Standard Tessellation Language (STL) biçimli dosyaya dönüştürülmektedir. 3B katı model, STL formatına dönüştürüldükten sonra Eİ arayüzüne gönderilmeye hazır hale getirilmektedir (Duman ve Kayacan, 2016).

Eİ'nin temel işlem basamaklarını Şekil 1.1'deki gibi gösterilebilir (Çelik vd., 2013).

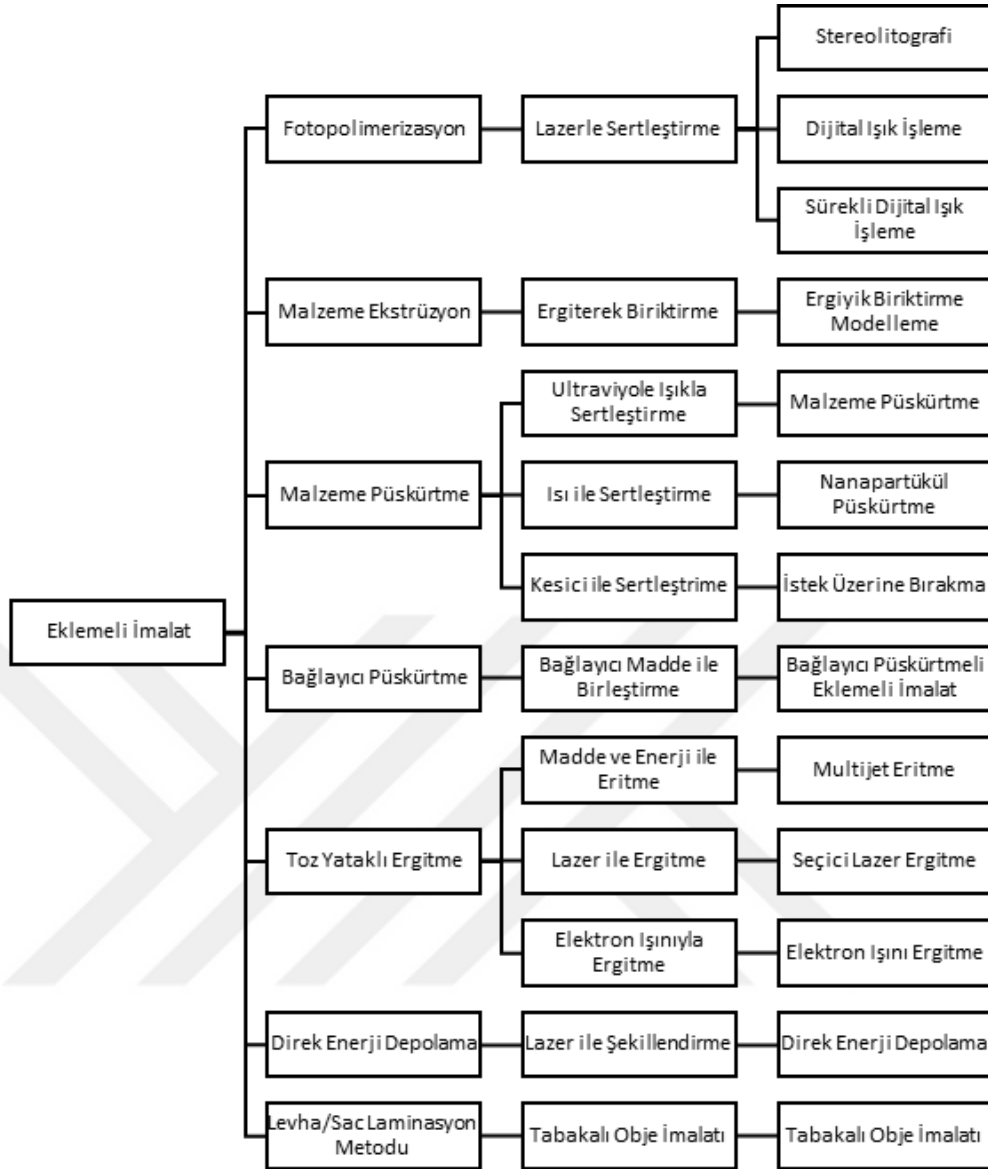


Şekil 1.1. Eklemeli İmalat İşlem Basamakları (Çelik vd., 2013)

Bu tez çalışmasında, Eİ türlerinden biri olan Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat (BPMEİ) yöntemiyle 316L metal toz ham madde ile test parçaları imal edildi. Numunelerin mekanik özelliklerine; katman kalınlığı, reçine çeşidi, reçine/toz oranı ve sinterleme sıcaklığı parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelendi. Bu etkiyi görmek için de ham ve sinterlenmiş yoğunluk ölçümleri, basma dayanımı, mikrosertlik ve mikro içyapı analizi yapıldı.

1.1. Eklemeli İmalatın Sınıflandırılması

Eklemeli İmalatın sınıflandırılması konusunda pek çok parametre göz önüne alınabilir. Ancak bunlar arasında en iyisi, besleme malzemesine göre sınıflandırmaktır. Besleme malzemesi ergiyik, toz, tel ve sac formda olabilmektedir. Genel olarak Şekil 1.2'deki gibi bir şema çizilebilir. (Yalçın ve Ergene, 2017)



Şekil 1.2. Eklemeli imalatın sınıflandırılması (Yalçın ve Ergene, 2017)

1.1.1. Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon başlığı, Stereolitografi, Dijital Işık İşleme ve Sürekli Dijital Işık İşleme olarak 3 farklı yönetime ayrılır.

1.1.1.1. Stereolitografi

Stereolitografi (SLA) yöntemi, Ultraviyole (UV) ışık ile kürleme işleminin yapıldığı Eİ yöntemlerinden en yaygın olanıdır. Bu yöntemde fotopolimer reçine

ile dolu bir tank içerisine yerleştirilmiş bir imalat platformu üzerinde, lazer yardımı ile katman katman imalat yapılır. (Redwood, 2019)

1.1.1.2 Dijital ışık işleme

Dijital Işık İşleme (Dİİ) SLA'ya benzer bir yöntemdir. Aralarındaki fark SLA'daki tarama yapan lazer yerine Dİİ'de dijital ekranlı bir projektör ile katmanın tamamı aynı anda kürlenir. Dİİ yöntemi bu sayede SLA yönteminden daha yüksek imalat hızlarına ulaşabilir. (Redwood, 2019)

1.1.1.3. Sürekli dijital ışık işleme

Sürekli Dijital Işık İşleme (SDİİ) ya da başka bilinen adıyla Sürekli Sıvı Arayüz İşleme yöntemi, Dİİ ile aynı şekilde çalışır. Fakat imalat tablası Z yönünde yukarı doğru sürekli hareket eder. Bu da her bir imalat sonrasında, imal edilen parçanın, imalat tablasından ayrılmasını gerektirmediği için daha hızlı bir imalat sağlar. (Redwood, 2019)

1.1.2. Malzeme Ekstrüzyon

1.1.2.1. Ergiyik biriktirme modelleme

Ergiyik Biriktirme Modelleme (EBM), filament haline getirilmiş ham maddenin bir ısıtıcı kafa vasıtasıyla belirli bir sıcaklıkta ergitilip imalat tablasına ekstrüze edilmesi prensibiyle çalışır (Lowa vd., 2017). EBM ile imalat, x-y kartezyen koordinatlarda hareket eden ısıtıcı kafa ve her katman kalınlığı için aşağıya inen bir imalat tablasının eş zamanlı hareket etmesiyle gerçekleşmektedir. EBM, malzeme ekstrüzyonuna dayanan en yaygın Eİ teknolojisidir (Lowa vd., 2017). EBM'de, filament olarak polimer, plastik ve karma malzeme kullanılmaktadır (Additive Manufacturing Research Group, 2019). Ancak gelişen teknoloji ile son yıllarda metal, seramik ve metal/seramik anafazlı karma malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır (Famodimu, 2016). EBM teknolojisinin, diğer Eİ

teknolojilerine göre düşük maliyetli ve kolay erişilebilir olması, kullanımını yaygınlaştırmıştır.

1.1.3. Malzeme Püskürtme

Malzeme Püskürtme başlığı Malzeme Püskürtme, Nano Partikül Püskürtme ve İstek Üzerine Bırakma olarak 3 farklı yönetime ayrılır.

1.1.3.1. Malzeme püskürtme

Malzeme Püskürtme (MP), püskürtme kafasında bulunan yüzlerce küçük lüleden fotopolimer reçinenin katman katman püskürterek imalat yapar. Bu çalışma prensibi tüm katmanı püskürtme kafasının tek bir geçişiyle imal ettiği için hızlı bir yöntemdir. Reçine damlaları katmana püskürtüldükten sonra UV ışık ile kürlenir. MP yönteminde, genellikle destek yapıları suda çözünebilen malzemeler ile yapılır. Bu sayede destek yapıları, su içerisinde parçadan kolaylıkla ayrılabilir. (Redwood, 2019)

1.1.3.2. Nano partikül püskürtme

Nano Partikül Püskürtme (NPP), imalat edilecek malzemenin nano partikül boyutlarındaki taneciklerinin, püskürtülen sıvı ile karıştırılması prensibine dayanır. Aynı şekilde destek yapısı malzemesi de sıvı içine eklenmekte ve püskürtücü kafalardan püskürtülmektedir. İmalat alanındaki yüksek sıcaklık, sıvının buharlaşmasına ve geride sadece metal malzeme kalmasını sağlamaktadır. (Redwood, 2019)

1.1.3.3. İstek üzerine bırakma

İstek Üzerine Bırakma (İÜB), 2 farklı püskürtme kafasının bir arada imalat yapmasını esas alır. Bir tanesi parafin tarzı ana malzemeyi püskürtürken; diğeri kolay çözülebilir destek yapılarını püskürtür. İÜB’de daha iyi bir birleşme açısından, her bir katmandan sonra kesici uç ile yüzey temizlenir. İÜB yaygın

olarak hassas döküm uygulamalarında, bozulabilir model oluşturmakta kullanılmaktadır. (Redwood, 2019)

1.1.4. Toz Yataklı Ergitme

Toz yataklı ergitme başlığı Multijet Eritme, Seçici Lazer Ergitme ve Elektron Işını Ergitme olarak 3 farklı yönetime ayrılır.

1.1.4.1. Multijet eritme

MultiJet Eritme (MJE), Seçici Lazer Ergitme ve MP teknolojilerinin bir birleşimidir. Öncelikle püskürtme kafası malzemeyi ham maddenin üzerine püskürtür ve plastik tozları üzerinde ince bir katman oluşturur. Daha sonra lazer güç kaynağı ile ilgili katmanda sinterleme işlemi yapılır. Reçine buharlaşırken, metal tozlarına bir şey olmaz. Parça tamamlanana kadar süreç tekrarlanır. (Redwood, 2019)

1.1.4.2. Seçici lazer ergitme

Lazer kaynağı ile katman birleştirme işlemi ilk defa hızlı prototipleme kavramının olduğu 1971 tarihli bir patent ile ortaya çıkmıştır (Ciraud, 1973). Bu aşamadan sonra lazer kullanımı gelişmeleri devam etmiş ve önemli bir buluş olarak 1981 yılında alınan bir patentle seçmeli lazer sinterleme kavramı ortaya konulmuştur (Housholder, 1981). 1980'ler itibariyle Texas Üniversitesi'ndeki çalışmalar ve alınan patentler sonucu lazer sinterleme yöntemi plastik tozlarının kullanımını kapsayacak şekilde literatürde Eİ yöntemi olarak yerini almıştır (Deckard, 1989). 1986 yılında lazer kaynağının ilk defa reçine bazlı parça imalatında kullanımı gerçekleştirilmiştir (Hull, 1986). 1987 yılında metal tozu ham maddelerin de lazer ile taranarak yakılması çalışmaları ortaya konulmuş ve bu da Seçici Lazer Sinterleme (SLS) metodu olarak adlandırılmıştır (Feygin, 1987; Electronic Engineering Times, 1987; Kruger vd., 1999). SLS metodu plastik, reçine bazlı veya yaygın kullanımıyla metal malzemeyi ham madde olarak farklı formlarda (toz, eriyik vs.) kullanabilen, güç kaynağı olarak

lazer ışını kullanan makinelerin kullandığı metodun genel adıdır. Metal tozlarını ham madde olarak kullanan, herhangi bir bağlayıcı kullanmayan, imalat yataklı SLS yönteminin ismi ise literatürde doğrudan metal lazer sinterleme Direk Metal Lazer Sinterleme (DMLS) olarak ifade edilebilmektedir (Shellabear ve Nyrhila, 2004; Karapatis vd., 1998; Khaing vd., 2001).

Metal lazer sinterleme işlemi, metal tozlarının hareket edebilen bir zemine serilerek, lazer ışının kullanımıyla sinterlenerek birleştirilmesini ifade etmektedir. Metal lazer sinterleme sürecinde imal edilecek parçanın ham maddesi olan toz metal, toz haznesinden alınarak, imalatın yapılacağı tabla üzerine bir serici mekanizma ile serilmektedir. Kalınlığı katman kalınlığı olarak adlandırılan düzgün serilmiş toz, belli mesafede yukarıya konumlandırılmış lazer ışını tarafından malzemenin ergime sıcaklığından daha alt bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Bu sayede küçük çaplı tozlardan katı bir malzeme elde edilmektedir. Bu toz çapları, malzeme türüne ve üretim teknolojisine göre genelde 20-50 µm aralığında bulunan toz taneleri bu sıcaklıkta birbirleriyle kaynaşıp birleşmektedir ve oluşan tanecik boyutu 10-80 µm aralığında olabilmektedir (Santosa vd., 2006; Vijay vd., 2013).

1.1.4.3 Elektron ışıkla ergitme

Elektron Işıkla Ergitme (EIE), metal toz tanelerini birbirine bağlamak için lazere göre daha yüksek bir enerji kullanır. Gerekli geometrideki katmanı ergiterek, soğuması sonrasında katmanı oluşturur. EIE’de, SLE’ye göre daha az kalıntı gerilme oluşur. SLE’ye göre daha hızlı imalat yapmasına rağmen, tanecik boyutu, katman kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından dezavantajlıdır. Ayrıca EIE’de vakum ortamlı atmosfer gereklidir (Redwood, 2019).

1.1.5. Levha/Sac Laminasyon Metodu

1.1.5.1 Tabakalı obje imalatı

Bu yöntemde imalat tablasına sac rulo halinde plastik ya da sac metal ham madde (metal, polimer, karma malzeme) beslenerek lazer ile ilgili katmanın dış hattı kesilmekte ve ısıtılmış bir silindir vasıtası ile iki katmanın birbiriyle kaynaşması sağlanmaktadır. Bu yöntem genel anlamda hızlı ve düşük maliyetli olması gibi avantajlarının yanında ham madde israfı ve düşük mukavemet, sınırlı ham madde gibi dezavantajları bulunmaktadır (3D Print Expo, 2018).

1.1.6. Direk Enerji Depolama

Direk Enerji Depolama (DED), çok eksenli bir harekete sahip olan lüle yardımıyla, ergiyik malzemenin bir tabla üzerine katılaştırılarak biriktirilmesi prensibiyle çalışır. En belirgin özelliği lülenin 4-5 ekseninde hareket edebilmesidir. DED; polimer ve seramikler ile birlikte kullanılmasının yanı sıra, çoğunlukla toz ve ya tel şeklinde metallerle çalışılır (Additive Manufacturing Research Group, 2019).

1.1.7. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat

Eİ türlerinden biri olan Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat' da (BPEİ); ürünü oluşturacak olan malzemenin tozu, toz serme sistemi ile serilir. Ardından püskürtmeli yazıcılara benzer şekilde bağlayıcı malzeme, damla damla bir katman üzerine püskürtülür. Püskürtme işlemi sonucunda, istenen geometri iki boyutlu olarak elde edilir. Arkasından bir sonraki katmana geçilerek aynı işlemler tekrarlanır ve parça üç boyutlu hale getirilir. İmalat işlemi bittikten sonra parça ham haldedir. Çoğu zaman mekanik özellikleri artırmak için son işlemler (kaplama, infiltrasyon vb.) yapılır. Kaplama malzemesi olarak yapıştırıcı (seramiklerde) ve infiltrasyon malzemesi olarak bronz (metallerde) kullanılan son işlem malzemelerine örnektir (Redwood, 2019).

1.1.7.1. Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat

BPMEİ cihazlarında 316, 316L, 420, Inconel 625/718, kobalt/krom ve tungsten karbür gibi ileri teknoloji metalleri kullanılarak parça imal etmek mümkün

olduğu gibi, bu ve benzeri malzemelerle kompozit teknolojisi de emdirme yöntemi ile kullanıma uygundur (Exone, 2019). Bu malzemeler genel olarak otomotiv, havacılık, savunma sanayi gibi ileri mühendislik malzemeleri ihtiyacı olan alanlarda tercih edilmektedir. Bunlara ilave olarak diğerk sektörlerde de yüksek mekanik özellikler ve karmaşık geometri gereksinimi olan özel alanlarda tercih edilmektedir (Mouritz, 2012).

Diğerk mevcut MEİ metotlarında olduğu gibi, halen geliştirilen BPMEİ cihazlarında da imal edilen parçalar doğrudan fonksiyonel hale gelmez. BPMEİ’de ilk adımda ham mukavemete sahip düşük yoğunluklu parçaların imalatı söz konusudur. Bu parçalara çeşitli son işlemler (kürleme, sinterleme, infiltrasyon vb.) uygulanarak parçanın mekanik özellikleri istenen düzeye getirilmektedir. Bu adımlardan biri olan infiltrasyon, sinterleme esnasında ana parça malzemesinden daha düşük sıcaklıkta ergiyen bir metalin (bronz, bakır, gümüş vb.) parçaya emdirilme işlemidir. Bakır, gümüş, alüminyum da emdirme malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Yin vd., 2007; Myers vd., 2015; Tuffile vd., 2016).

BPMEİ yönteminin çalışma adımları;

- Toz ve bağlayıcı ham maddenin ilgili hazneleri doldurulması,
- Tozun, besleme ünitesinden alınarak serici mekanizmayla imalat tablasına pürüzsüz bir şekilde serilmesi,
- Tablaya serilen tozların gerekli kısımlarına (katı model geometrisine göre) bağlayıcının püskürtülmesi,
- Püskürtülen bağlayıcının özelliğine göre (hava ortamında, CO₂’li ortamda, ışıkla (UV), sıcaklıkla vb. sertleşen bağlayıcılar) sertleştirme (kürleme) işleminin yapılması,
- İmalat bitene kadar her bir katmanda serme, bağlayıcı püskürtme ve kürleme işlemlerinin tekrarlanması,
- İmalat işlemi tamamlandıktan sonra toz yatağı içinde bulunan imalat parçalarının, bağlanmayan tozlardan temizlenmesi,

- İmalat parçasının fırınlama işlemine alınarak; bağlayıcının uçurulması (piroliz) ve bağlayıcı sayesinde bir arada duran tozların metalik bağ ile kaynaşmasının sağlanması (sinterleme),
- Parçadan uçurulan bağlayıcıdan arta kalan boşluklara sıvı metal emdirilmesi (infiltrasyon),
- İhtiyaca göre basınçlı sinterleme vb. [genellikle Hot Isostatic Pressing (HIP)/Sıcak İzostatik Presleme (SİP)] gibi işlemler sonucunda fonksiyonel parçanın imalatı şeklindedir.

BPMEİ genel olarak; pompalar, türbinler, ısı eşanjörleri, filtreleme sistemleri, güç aktarım organları, bazı protezler vb. parçalarda kullanılır. Bu alanlarda BPMEİ yöntemi genellikle, parçalara korozyon direnci, yüksek aşınma direnci ve mukavemet sağladığı için tercih edilmektedir. Diğer metal Eİ metotlarına göre çok daha hızlı ve düşük maliyetli imalat metodudur. Çizelge 1.1’de metal Eİ yöntemlerinin, marka model, imalat hacmi, imalat hızı, imalat ortamı ve ısı kalıntı gerilme oluşturma durumlarını gösteren bir karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 1.1. Metal Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Özellikleri (Exone, (2019), Desktop Metal (2019), EOS (2019), SLM Solutions (2019), Digital Metal (2019), XJet (2019), Arcam (2019), Hrabec vd. (2017))

Yöntem	Marka/Model	İmalat Hacmi (mmXmmXmm)	İmalat Hızı (cm ³ /sa)	Katman Kalınlığı (mm)	İmalat Ortamı	Isıl Kalıntı Gerilme
BPMEİ	Digital Metal DM P2500	203x180x69	100	0,035	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Desktop Metal Production System	330x330x330	8200	-	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Exone Innovent	160x65x65	125	0,100	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Exone M-Flex	400x250x250	1800	0,100	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Exone M-Print	800x500x400	-	0,100	Açık Hava	Yok
SLE	SLM Solutions SLM280	280x280x365	88	0,020	Ar-N	Var
SLE	SLM Solutions SLM500	500x280x365	171	0,020	Ar-N	Var
SLE	EOS M280	250x250x325	-	0,020	Ar-N	Var
SLE	EOS M400-4	400x400x400	100	-	Ar-N	Var
EIE	ARCAM Q20plus	Ø350x380	-	0,140	Vakum	Var
EIE	ARCAM A2X	200x200x380	55-80	-	Vakum	Var
NPP	XJet Carmel1400	500x280x200	210	0,003	Basınçlı Hava	Yok
NPP	XJet Carmel700	500x140x200	105	0,010	Basınçlı Hava	Yok

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez kapsamında literatür taraması; toz ham madde, bağlayıcılar, toz ve bağlayıcılar arasındaki oran, katman kalınlığı, bağlayıcının piroliz kabiliyeti, sinterleme sıcaklığı, süresi ve ortamı başlıkları altında yapılmıştır.

2.1. Toz Ham Madde

BPMEİ'de toz seçiminde toz malzemenin türü, alaşım elementleri, tanecik boyutlandırması ve toz geometrisi gibi parametreler, daha yoğun ve mukavemetli numunelerin imalatı açısından önem arz etmektedir (Sachs vd, 2000; Cima vd, 1995).

Utela vd. (2008), yaptıkları çalışmada BPMEİ için kullanılan ham madde tozlarının 20 µm'den büyük olması durumunda;

- Tozun serilmesinin kolay,
- Toz yüzey alanının az,
- Büyük gözeneklerin kalmasının bağlayıcının emilimi açısından kolay olduğunu söylemiştir.

Aynı çalışmada 5 µm daha küçük tozlar ile imalat yapıldığında;

- Sinterlenme yeteneğinin iyi olduğu,
- Yüzey pürüzlülüğünün azaldığını,
- Daha ince bir katman ile çalışabilme imkânı olduğu,
- Zor serilebilen bir yapıya sahip,
- Bağlayıcının tozları ıslatma sorununun yaşandığı,
- Bulamaç halinde çökelme durumlarının yaşanabildiğini bahsetmişlerdir.

Bredt vd. (2006)'e göre, topaklanma etkisini azalttığı için 20 µm ve üzerindeki tozların tercih edilmesi uygundur. Toz boyutunun fazla büyümesi, yüzey pürüzlülüğünü ve katman kalınlığını artırdığı ifade edilmiştir. Lorenz vd.

(2004), tozların daha küçük taneli olması kılcallıktan oluşacak basıncı artırarak; ilfintrant maddenin nüfuziyetini artırdığını tespit etmişlerdir.

BPMEİ'de tozların fiziksel özellikleri üzerine yapılan çeşitli çalışmalar incelendiğinde;

- Do vd. (2017), imalat için %60 14 μm , %40 4 μm oranında,
- Mustafaei vd. (2017), Inconel 625 malzeme için 65-110 μm arası,
- Miyanaji ve Yang (2016) SS420 için 10-40 μm arası,
- Enneti vd. (2017) WC + %12 Co karışımlarında 20-45 μm arası,
- Cordero vd. (2017) SS420 için 45 μm ,
- Doyle vd. (2015) SS420 için 30 μm ,
- Turker vd. (2008) Inconel 718 malzeme için 20-53 μm arası,
- Do vd. (2018) ise SS316L için yaptıkları çalışmada 4, 14, 30 ve 82 μm boyutlarındaki tozlardan farklı oranlarda karışım toz ham madde kullanıldığı görülmüştür.

Tozların büyük ve küçük olmasının avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan en üst seviyede yararlanmak ve dezavantajları en aza düşürmek için tozlar karışım halinde de kullanılmaktadır. Karıştırılmış tozlar ile imalatı yapılan numunelerin ham yoğunluk oranları %50 değerinden %65 değerine kadar artmıştır (Do vd., 2018).

Katman kalınlığı 50-200 μm arasında değişirken, katman kalınlığının artması, özellikle düşük sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunenin yoğunluk oranını azaltmaktadır (Turker vd., 2008). Katman kalınlığının artması akma ve çekme dayanımlarını da düşürmektedir (Doyle vd., 2015).

2.2. Bağlayıcılar

BPMEİ'de bağlayıcılar, metal tozlarını, sinterleninceye kadar bir arada tutmak için kullanılır. Bağlayıcıların viskozitesi, yüzey enerjileri, uçabilirlik özellikleri, fiyatları, ıslatabilirlik kabiliyeti, bağlayıcıların seçiminde dikkat edilmesi

gereken özelliklerdir (Utela vd., 2008). Bağlayıcılar, katman üzerine püskürtüldükten sonra hemen katılaşmamalı, , toz üzerinde 10-40 µm kadar yayılmalı ve alttaki katmana da kısmen etki ederek, katmanlar arası bir birleşme sağlamalıdır. Aksi halde katmanlar arasında bağlanmama sıkıntısı yaşanabilir. Katılma; bağlayıcının cinsine bağlı olarak kimyasal, ısı, vakum, ışı ve basınç etkisiyle olabilmektedir (Sachs vd., 1998). Reçineler sınıflandırma yapıldığında furan, alkid, sodyum silikat, fenolik, CO₂ ile kürlen, UV ile kürlen (SLA) şeklinde ayrılabilirler.

Furanda, furfuril alkol ile üre formaldehit veya fenol formaldehit bazlı reçineler kullanılmaktadır. Bu yöntemde bağlayıcı asit katalizörler ile (genellikle toluen veya benzen sülfonik asitler) sertleştirilmektedir. Sertleşme esnasında polimer reçine toz tanelerini bağlar (Kocaeli Makine, 2019). Mandorf (1988), seramik tozlarının bağlanmasında furfuril alkolün kürlenmesi için, çinko klorür ve p-TSA kullanmış. Brown ve Watson (1971), cam fiberlerin, Wang vd., (2003), karbonlu malzemelerin, Pranger vd., (2012) ise polimer bazlı nanokompozitlerin reçine yapıları için FA'yı p-TSA ile sertleştirmişler.

Alkid reçineler, alkid-yağ yöntemi veya yağ-üretan şeklinde de bilinir. Sentetik yağ bağlayıcı ve kimyasal aktivatörlerin hava ortamında sertleşmesiyle bağlama işlemini yapar. Yağ bağlayıcıların viskozitesi furana göre yüksektir. Sertleştirici katalizör olarak MDI (Metilen Difenol Diizosiyanat) kullanılır. Sertleştirici, bağlayıcı miktarının %20'si kadar eklenir. (Kocaeli Makine, 2019)

Sodyum silikat, toz sertleştiricili yöntemdir. Başlıca çeşitleri; Dikalsiyum silikat içeren metalurjik cüruflar, Sentetik dikalsiyum silikat, yüksek fırın ve portland çimentoları, Ferrosilisyum, Silisyum tozu, Kalsiyum karbürdür. Bağlayıcı olarak, bütün toz sertleştirici yöntemlerde cam suyu (sodyum silikat-su çözeltisi) kullanılır. Karışıma ilave edilen cam suyu %4 ila %6 kadardır. Daha fazla cam suyu, dağılabilme (collapsibility) özelliğini bozar. Yukarıda belirtilen sertleştiriciler ise toz olarak %1-6 oranda ilave edilir.

Fenolik reçineler, pepset yöntemi olarak da bilinir ve tozun iki ayrı bağlayıcı ile karıştırıldıktan sonra sıvı sertleştirici ile sertleştirilmesini esas alır. Sertleştiriciler sıvı katalizör fenolik üreterdir.

CO₂ sertleştirme, gaz sertleştiricili silikat yöntemidir. Sodyum silikatın CO₂ gazı ile silisik asit olarak sertleştirilmesini esas alır. Birleştirilecek toza %3-4 ilave edilir. (Kocaeli Makine, 2019)

SLA reçineler, UV ışık ve sıcaklıkla sertleşen fotopolimer reçinelerdir. Yapılan çalışmalarda; Taormina vd., (2018) SLA reçine ile fotopolimerizasyon yöntemiyle, katman katman UV ışık ile kürleme yapmışlardır. İmal ettikleri numuneleri 20 dakika İPA'da (imalat sırasında kürlenmeyen sıvı reçinelerin imalat yapısından uzaklaşması amacıyla), daha sonra son kürleme için 90°C sıcaklıkta 1 saat bekletmişlerdir. Hague vd.,(2004) imalat sonrası 3 farklı son kürleme işlemine numuneleri tabi tutmuştur. Bunlar;

- 90 dakika UV ışık ile son kürleme,
- 90 dakika UV ve sonrasında 2 saat 80°C'de sıcaklıkla son kürleme,
- 90 dakika UV ve sonrasında 24 saat 80°C'de sıcaklıkla son kürleme şeklindedir.

Binnion ve Arts.(2016), ise fotopolimerizasyon yöntemiyle hassas döküm için bozulabilir model tasarlamışlardır. Numunelere son kürleme olarak;

- 60 dakika UV ışık ile son kürleme,
- 90 dakika UV ışık ile son kürleme,
- 93°C'de 60 dakika son kürleme,
- 80, 95, 110, 125, 150 ve 175°C'lerde 30'ar dakika son kürleme,
- Tüm bu atmosfer ortamında yapılan kürlemelerin haricinde, 93°C'de 90 dakika inert gaz ortamında son kürleme işlemi de yapılmış.

SLA reçinelerin BPMEİ yönteminde, metal tozlarının bağlanması amacıyla kullanıldığı bir çalışma bulunamamıştır.

Snelling vd., (2014), kum kalıpların yapımında çeşitli bağlayıcılar kullanmışlar. Çizelge 2.1’de kullandıkları bağlayıcının markası, imalat yöntemi ve bağlayıcı malzeme tipi verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kum Kalıp Yapımında Kullanılan Reçineler ve Katalizörleri (Snelling vd., 2014)

Reçine Markası	Yöntem	Reçine Türü
ExOne Kum Reçineleri	Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat	Furan Reçine ve Bağlayıcı Katalizörü
Alkid 18-415 ve Alkid 23-217 Yardımcı Reaktantı	Karıştırılarak	Alkid Reçine ve Katalizör
Super Set 942 ve TW30	Karıştırılarak	Furan Reçine ve Asit Katalizör
Chem Bond 490 ve Chem Bond 260	Karıştırılarak	Soydum Silikat Reçine ve Gliserin Katalizör
Phenoset-RB 1. Kısım ve APR-015 2. Kısım	Karıştırılarak	Fenolik Reçine ve Asetit Ester Katalizör

2.3. Toz Ham Madde-Bağlayıcı Karışım Oranı

Utela vd. (2008), BPMEİ’de imal edilen numunenin hacimce %30-75 arası metal tozu, %10 bağlayıcı ve kalan kısmının da boşluktan oluştuğunu belirtmiş. Bai ve Williams (2015), 316L ile yaptıkları çalışmada ise yaptıkları çalışmada hacimce %70 toz, kalan kısmın bağlayıcı olması gerektiğini söylemiş. Miyanaji ve Yang (2016), 420 paslanmaz çelik tozu için ideal bağlayıcı oranının hacimce %29 olması gerektiğini aktarmış. Enneti vd., (2017), WC-%12Co tozunda hacimce %45 bağlayıcı oranı (%3,5 ağırlıkça bağlayıcı) kullanmıştır.

Snelling vd. (2014) kum kalıplar üzerine yaptıkları çalışmada,

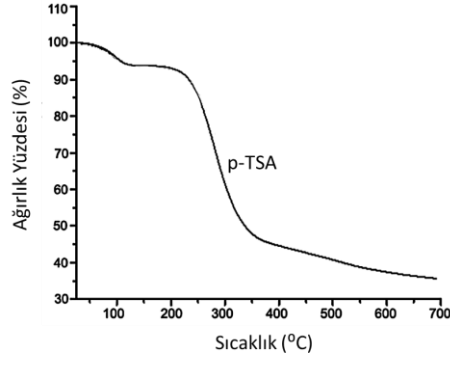
- Alkid 18-415 reçineyi kumun ağırlıkça %1,5’u, Alkid 23-217 katalizörü reçinenin ağırlıkça %20’si,
- Super Set 942 reçineyi kumun ağırlıkça %1’i, TW30 katalizörü reçinenin ağırlıkça %35’i,
- Chem Bond 490 reçineyi kumun ağırlıkça %3’ü, Chem Bond 260 katalizörü reçinenin ağırlıkça %10’u,
- Phenoset-RB 1. Kısım reçineyi kumun ağırlıkça %1,6’sı, APR-015 2. Kısım katalizörü reçinenin %25’i kadar karıştırmışlar.

2.4. Islatabilirlik

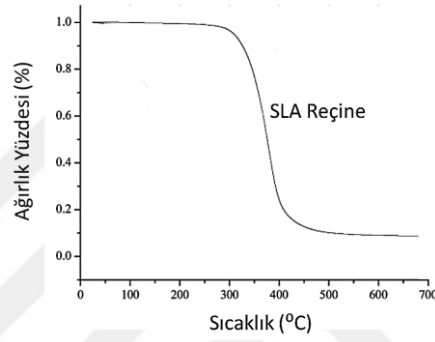
BPMEİ'nin en önemli sorunlarından birisi ıslatabilirlik, yani bağlayıcıların üzerine püskürtüldükleri metal tozlarına etki edememesidir. Metallerin toz halinde bulunmasından dolayı yüzey gerilimleri çok fazla olduğu için, kolay kolay reçineler tarafından etkin nüfuziyet olamamaktadır. Bu durumda reçinelerin ıslatabilirlik (wettability) değerlerinin artırılması gerekmektedir. Bu amaçla bağlayıcılar içerik olarak su, çözücü ve viskozite düşürücü katkılara daha iyi nüfuziyete sahip olabilir (Grau vd., 1999; Godlinski ve Movan, 2005). Islatabilirliğin artırılması için yapılan bazı çalışmalarda; Lu ve Li, (2014) metal tozunun içine SiC karıştırarak, reçinenin ıslatabilirliğini artırmışlar. Başka bir çalışmada (Bartolo ve Gaspar, 2008) reçinenin içine stiren malzemesini karıştırmışlar. Fu vd., (2010) ise reçinenin içerisine GNF (Grafite Nano Fiber) karıştırarak ıslatabilirlik sorununu çözmüşler.

2.5. Reçine Piroliz Durumları

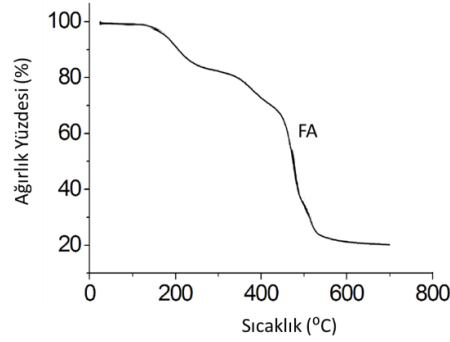
BPMEİ'de ile imal edilen numunelere sinterleme yapılırken, sinterleme sıcaklığına çıkılmadan önce numune içerisinde bulunan reçinenin uçması gerekmektedir. Bu uçma işlemine piroliz adı verilir. Reçinelerin numunelerin içerisinden daha iyi uçması için; fırının, reçinelerine buharlaşma sıcaklığında beklemesi gerekmektedir. Bu sayede reçinenin en az şekilde geride kül bırakması sağlanır. Reçinenin uçmasının hangi sıcaklıklarda, hangi oranlarda olduğu TGA analizleri ile anlaşılır. TGA analizleri sıcaklık arttıkça reçinenin oransal olarak ne kadarının uçtuğunu gösterir. Şekil 2.1.'de p-TSA, Şekil 2.2.'de SLA reçine ve Şekil 2.3.'de ise FA için TGA analiz grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.1. p-TSA TGA Analizi (Bansal vd., (2009))



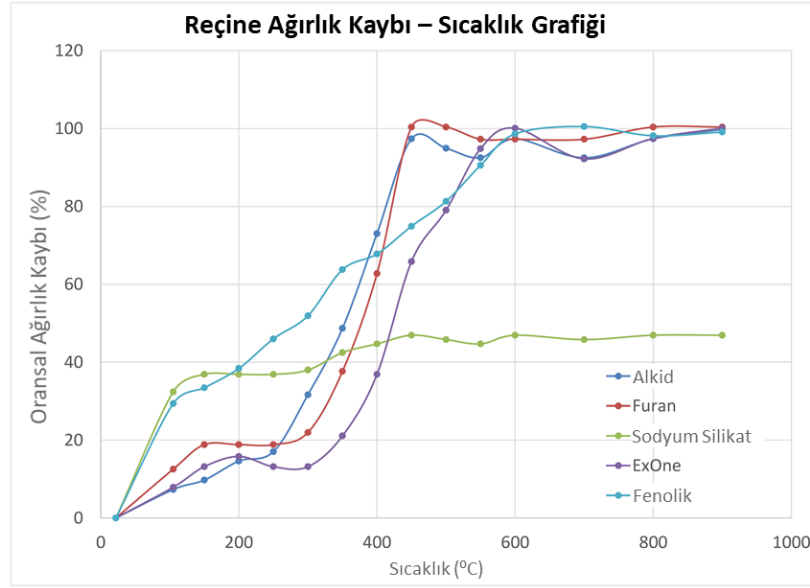
Şekil 2.2. SLA Reçine TGA Analizi (Lee vd.(2007))



Şekil 2.3. FA TGA Analizi (He vd., 2011)

Bu sonuçlara göre; p-TSA yaklaşık ağırlığının %35'i, SLA ağırlığının %10'u, FA ise ağırlığının %20'si kadar kül bırakmaktadır.

Snelling vd. (2004), yaptıkları çalışmada alkid, furan, sodyum silikat, ExOne firması ve fenolik reçinelerin TGA analizlerini Şekil 2.4'deki gibi vermişler.



Şekil 2.4. Alkid, Furan, Sodyum Silikat, Exone ve Fenolik Reçine TGA Analizi
(Snelling vd. (2004))

Şekile bakıldığı zaman reçinelerde genel olarak 300-500°C arasında en yüksek oranda buharlaşma olmuş ve Sodyum Silikat reçine hariç diğerlerinin tamamı buharlaşmıştır.

2.6. Sinterleme

BPMEİ’de tezgahta ham mukavemete sahip olarak imal edilen numunelerin, sinterleme işlemine tabi tutularak gerçek mukavemet değerlerini kazanmaları sağlanır. 316L paslanmaz çeliğin sinterleme sıcaklığı, sıcaklık artış hızı, sinterleme süresi ve sinterleme ortamı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Vangapally vd., (2017), 316L parçaları için 1100°C’de 2 saat ve 4 saat, 1200°C’de de aynı şekilde 2 saat ve 4 saat sinterleme yapmışlardır. Numunelerin basma dayanımlara incelendiğinde, sinterleme sıcaklığı ve süresinin artması, basma dayanımını artırdığı sonucu çıkarılmıştır.

İncelenen çalışmalarda, fırın ortamındaki yüksek sıcaklıklarda numunelerin korozyona uğramaması için, fırın ortamı Ar ve H₂ gazlarından birini ya da birlikte ikisini kullanmışlardır (Do vd., 2017; Johnston vd., 2004). Bazı

çalışmalarda fırın atmosferi, imalatın başında vakumlanırken (Mostafaei vd., 2017), bazı çalışmalarda adı geçen gazlar ortama basıldıktan belli bir süre sonra vakumlama işlemi yapılmıştır (Enneti vd., 2018, Do vd., 2017).

Do vd. (2017), sinterleme sıcaklığı olarak 1150, 1250 ve 1350°C (316L metal tozunun yaklaşık %95'i sıcaklıkta) sıcaklıklarda, 4 saat sinterleme yapmışlar, sinterleme sıcaklığına 5°C/dk ısıtma hızı ile çıkıp, aynı hızla soğutma yapmışlardır. Bir başka çalışmada (Johnston vd., 2004) ise, 316L parçalarını 28 L/saat debi ile argon ortamında sinterlemesi gerçekleşmiştir. Numuneler nce 465°C'ye 5°C/dakika hız ile çıkarılırken, 200 ve 465°C'de 30'ar dakika bekletilmiştir.

Numunelerin sinterleme sürecinde, fırın sıcaklıkları doğrudan sinterleme sıcaklıklarına yükseltilmemiş, belli sıcaklıklarda belli sürelerde bekletilerek yükseldiği görülmüştür (Do vd., 2017, Tang vd., 2016). Bunun temel amacı, numuneler içersinde bulunan bağlayıcıların en fazla şekilde buharlaştırarak, geriye en az miktarda atık bırakmasını sağlamaktır.

Sinterleme sıcaklığına yükselirken, Johnston vd., (2004), sıcaklık artış hızı olarak 4, 7, 10 ve 20°C/dk, sinterleme sıcaklığı olarak 1010, 1100, 1180 ve 1263°C ve sinterleme süresi olarak 2 saat süre tercih etmişlerdir. Gülsoy (2008) ise, 316L için 1250-1385°C sinterleme sıcaklığını tercih etmiş; 1100°C'ye kadar 10°C/dakika, sonrasında sinterleme sıcaklığına kadar 5°C/dakika sıcaklık artış hızını kullanmışlardır.

Sinterleme sıcaklığının artırılması ile yoğunluk doğru orantılı olarak artmaktadır (Turker vd., 2008). Sinterleme sıcaklığının artışı aynı zamanda malzemelerin çekme dayanımlarını da yükseltmektedir (Mostafaei vd., 2017).

Frykholm vd. (2016) yaptıkları çalışmada, sinterlenmiş numune içerisinde bulunan C ve O₂ değerlerinin, sinterleme sıcaklığı arttıķa değiştiğini belirtmişlerdir. Ti malzeme ile yaptıkları çalışmada, sinterleme sıcaklığı 1250°C'den 1350°C'ye çıktığında, yapıdaki ağırlıkça C oranı %0,08'den %0,03'e

düşerken, O₂ oranı %0,20'den %0,26 ya yükselmiştir. Ren vd. (2017) yaptıkları çalışmada sinterleme sıcaklığı ve süresi arttıkça, sinterlenen numunelerin sertlik değerinin artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.2'de literatürdeki çeşitli çalışmaların ham madde, katman kalınlığı, reçine oranı, sinterleme süreci, ham yoğunluğu, sinterlenmiş yoğunluğu, mekanik dayanımı, sertlik değerleri verilmiştir.



Çizelge 2.2. BPMEİ’de Etken Parametrelerin Literatürdeki Yeri

	Ham madde	Toz Çapı (µm)	Katman Kalınlığı (µm)	Piroliz	Sinterleme Süresi	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Ortamı	Reçine Oranı	Ham Yoğunluk Oranı (%)	Sinterlenmiş Yoğunluk Oranı (%)	Sertlik	Mekanik Dayanım
Lorenz vd. (2004)	SS316L	-	-	-	-	-	-	-	56,5	-	-	-
Miyanaji ve Yang (2016)	SS420	10-40	-	-	-	-	-	Hacimce %29 bağlayıcı	55,76	-	-	-
Enneti vd. (2018)	WC-%12Co	20-45	-	-	45 dk	1435,1465, 1485	Ar ve Vakum	Hacimce %45 (ağırlıkça %3,5) bağlayıcı	42	92-94	1200-1300 HV	Tokluk 17 MPa.m ^{0,5}
Do vd. (2017)	SS316L	%60 14 %40 4	100	460°C 120 dakika	4 saat	1150,1250, 1350	Ar ve Vakum	-	56,41	75-99	68-85 HRA	-
Vangapally vd. (2017)	SS316L	-	-	-	2,4 saat	1100,1200	-	-	-	-	-	Basma 24,1-1090,7 MPa
Tang vd. (2016)	SS316L	-	-	625°C 90 dakika	2 saat	1200	-	-	-	-	-	-
Frykholm vd. (2016)	SS316L	-	-	-	-	1360-1380	-	-	-	96	60-62 HRB	Çekme 511-528 MPa
Nastac vd. (2017)	SS316L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66 HRB	Çekme 517 Mpa
Johnston vd. (2004)	SS316L	-	-	465°C 30 dakika	2 saat	1010-1263	%96 Ar - %4 H ₂	-	-	-	-	-
Utela vd. (2008)	-	<5 >20	-	-	-	-	-	Hacimce %30-75 metal tozu, %10 bağlayıcı, kalanı boşluk	-	-	-	-
Mostafaei vd. (2017)	Inconel 625	65-110	-	-	4 saat	1225-1300	Vakum	-	50-60	95-99,2	190-327 HV	Çekme 386-710 Mpa
Bai ve Williams (2015)	SS316L	-	-	-	-	-	-	Hacimce %70 bağlayıcı, kalanı bağlayıcı	-	-	-	-
Cordero vd. (2017)	SS420	<45	100	600°C 90 dakika	90 dakika	1100	-	-	-	-	-	-
Doyle vd. (2015)	SS420	30	50-100-200	600°C 25 dakika	100 dakika	1100	Ar	-	-	-	-	Çekme 503-740 MPa
Turker vd. (2008)	Inconel 718	20-53	100-125-150-175-200	-	2 saat	1260,1280, 1300	-	-	-	88-99	-	-
Gülsoy (2008)	SS316L	-	-	-	1 saat	1250-1385	H ₂	-	-	-	-	-
Do vd. (2018)	SS316L	4,14,30 ve 82	100	460°C 120 dakika	-	1150,1250, 1350	Ar ve Vakum	Ağırlıkça %5,53 bağlayıcı	50-63	71-99,43	29,5-94 HRB	Çekme 404-457 Mpa

Literatür çalışmaları göz önüne alındığında, bu çalışmada;

- Katman kalınlığının, imalatın yapıldığı tezgahın özelliklerinin de imkanları doğrultusunda 200, 300 ve 400 μm seçilmesi ve mekanik özelliklere etkisinin görülmesi,
- Bağlayıcı olarak, Toluen asitlerle reçine oluşturan FA ve onu sertleştirmek için p-TSA kullanılması,
- Karşılaştırma yapılması için ikinci bağlayıcı olarak sıcaklık ve UV ile kürlenmiş SLA reçine kullanılması,
- Sinterleme sıcaklığının 1100, 1150 ve 1200°C seçilmesi ve numunelerin bu sıcaklıklarda 2 saat sinterlenmesi,
- Sinterleme sıcaklığına çıkılırken, sıcaklığın 450°C'de 250 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra, sıcaklığın artırılmasına değinilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

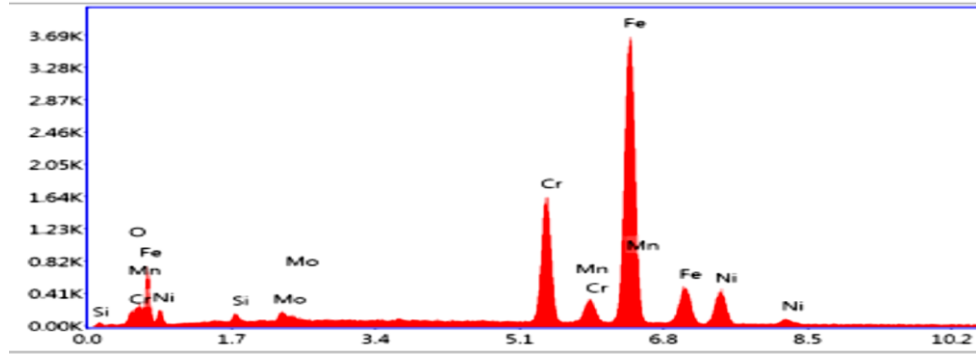
Materyal kısmında tez kapsamında kullanılan ham maddeler ve cihazlardan bahsedilirken, metot kısmında tezin yapımında izlenen yöntem anlatılmıştır.

3.1. Materyal

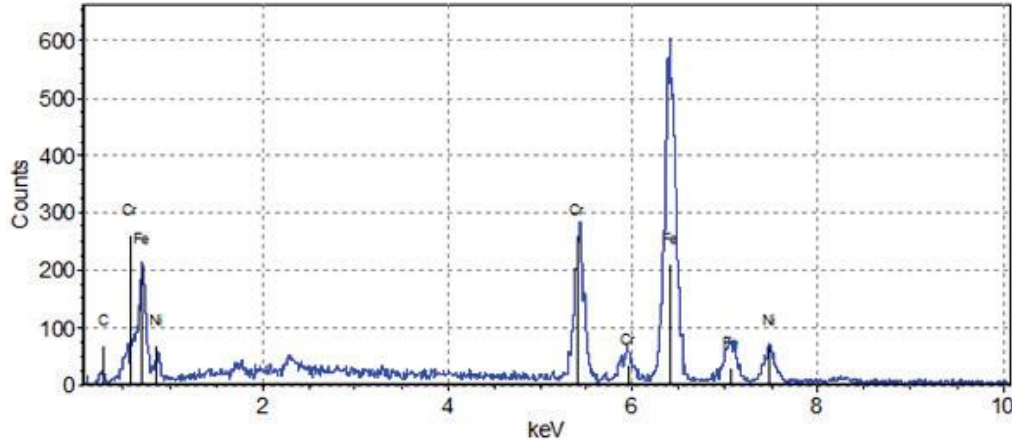
Materyal başlığında çalışmada kullanılan 316L toz ham madde, bağlayıcı reçine, BPMEİ prototip tezgahı, kütleme ve sinterleme fırınları, helyum piknometresi, hassas kesme, sıcak bakalit alma, zımparalama, mikrosertlik ölçüm cihazları, çeker ocak, basma dayanımı cihazı, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve ImageJ programından bahsedilmiştir.

3.1.1. 316L toz ham madde

Numunelerin imalatları başlamadan önce kullanılan 316L tozunun (20 – 53 μm tane boyutlarına sahip) XRD analizi yapıldı ve literatürle karşılaştırıldı. Şekil 3.1’de analizi yapılan, Şekil 3.2’de literatürdeki tozun kırınım deseni verildi.



Şekil 3.1. Çalışmada yapılan 316L kırınım deseni



Şekil 3.2. Literatürden 316L kırınım deseni (Rokosz vd., 2015)

Çizelge 3.1’de Fe dışında bulunan malzeme yüzdeleri kullanılan ham madde açısından literatür ile karşılaştırılmalı gösterildi. Her iki sonuç incelendiğinde tozların birbirine oldukça benzediği ancak çalışmada kullanılan tozda oksijen miktarının bir miktar fazla olduğu görüldü.

Çizelge 3.1. Literatür ve Analiz Sonucu 316L Malzeme Oranları

Bileşenler	%Si	%Mo	%Cr	%Mn	%Ni	%C	%S	%P	%N	%Cu	%O
Çalışmada Kullanılan	0,85	1,5	17,55	2,24	11,16	0	0	0	0	0	1,52
Rokosz vd. (2015)	0-0,75	2-3	16-18	0-2	10-14	0-0,03	0-0,03	0-0,045	0-0,1	0	0
Renishaw (2017)	0-1	2-3	16-18	0-2	10-14	0-0,03	0-0,03	0-0,045	0-0,1	0	0-0,1
EOS (2014)	0-0,75	2,25-3	17-19	0-2	13-15	0-0,03	0-0,01	0-0,025	0-0,1	0-0,5	0
Matmatch (2019)	2,3	2,5	17	1	12	0,03	<	Kalanı 0,5			>

3.1.2. Bağlayıcı reçine

Çalışma kapsamında 316L metal tozunun mekanik özelliklerinin hangi reçine ile daha iyi olduğunu anlamak açısından 2 farklı reçine tipi kullanıldı. Bunlardan biri katı reaktif ile kürlenene sıvı reçine, diğeri önce UV ışık ardından sıcaklık ile kürlenene fotopolimer reçinedir. Katı + sıvı kürlenene reçinede katı katalizör Para Toluen Sülfonik Asit (p-TSA), sıvı reçine olarak Furfuril Alkol (FA) tercih edilmiştir.. Fotopolimer reçine için ise SLA yönteminde kullanılan reçine IPA ile seyreltilerek kullanılmıştır.

3.1.2.1. Fotopolimer reçine

Fotopolimer (SLA) Reçine, ışığın molekül zincirlerini birbirine bağlamasıyla polimer hale gelir. Bu sayede katmanların üst üste eklenerek, imalatın yapılması sağlanır. Eİ alanında kullanılan reçinelerin, kullanım alanlarına göre bileşimleri değişmektedir. Görsel amaçlı üretimlerde standart, mekanik prototiplerde ABS özelliği gösteren daha dayanıklı reçineler kullanılabilmektedir. Bazı model çalışmalarında ise yarı esnek özellik gösteren reçineler tercih edilir (SLA – Reçine 3D Baskı Teknolojisi, 2019). SLA yönteminde yaygın olarak kullanılan reçine türü, BPMEİ yönteminde ilk defa bu çalışmada denenmiştir.

3.1.2.2. İzopropil alkol

İzopropil alkol (IPA), propan-2-ol, isopropanol veya 2-propanol isimleriyle bilinen renksiz, güçlü bir kokuya sahip yanıcı bir kimyasaldır. Kimyasal formülü C_3H_8O şeklindedir. IPA, etil selüloz, polivinil bürütal, birçok yağ, alkoloitler, zambak ve doğal reçineleri çözer. Çalışma kapsamında SLA reçinenin seyreltilmesi amacıyla kullanılan IPA'nın Şekil 3.2'de kimyasal özellikleri verilmiştir (Wikipedia, 2019a).

Çizelge 3.2. IPA Kimyasal Özellikleri (Wikipedia, 2019a)

Özellik	Değer
Kimyasal Formül	C_3H_8O
Molar Ağırlık	60,096 g/mol
Yoğunluk	0,786 g/cm ³
Erime Noktası	-89°C
Kaynama Noktası	82,6°C

3.1.2.3. Para tolüen sülfonik asit

Para tolüen sülfonik asit (p-TSA); suda, alkollerde ve diğer polar organik çözücülerde çözünebilen beyaz katı bir kimyasaldır. Diğer sülfonik asitler gibi güçlü bir organik asittir. Bu çalışmada p-TSA, furfuril alkolün sertleşmesi için katalizör görevi görmesi amacıyla kullanılmıştır. Toz ham madde arasına karıştırılarak, katman katman imalat tablası üzerine serilmiştir (Wikipedia,

2019b). Çizelge 3.3’de bu p-TSA’nın kimyasal özellikleri verilmiştir. BPMEİ yönteminde ilk defa bu çalışmada katı + sıvı şekilde kürlenene reçine kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. p-TSA Kimyasal Özellikleri (Wikipedia, 2019b)

Özellik	Değer
Kimyasal Formül	C ₇ H ₈ O ₃ S
Molar Ağırlık	172,2 g/mol (susuz) 190,2 g/mol (monohidrat)
Yoğunluk	1,24 g/cm ³
Erime Noktası	38°C (susuz) 103-106°C (monohidrat)
Kaynama Noktası	140°C

3.1.2.4. Furfuril alkol

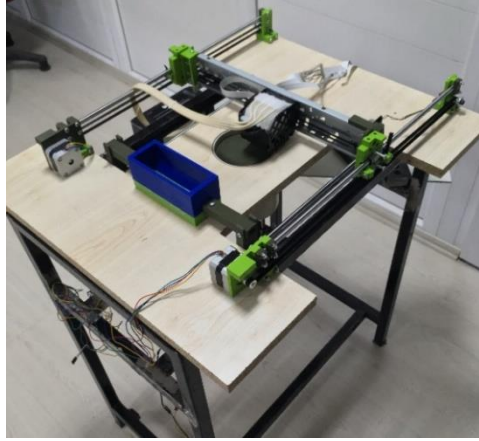
Furfuril alkol (FA), furan içeren bir organik bileşiktir. Asitler, ısı ve/veya katalizörler ile işleme tutulduğunda reçine halinde polimerleşir. Birincil kullanım amacı, sentezlenerek furan reçineye dönüşmesidir. FA, çimentolarda, yapıştırıcılarda, kaplamalarda ve döküm reçinelerinde kullanılmaktadır. FA, metal tozu ile karışık olan p-TSA katman serildikten sonra FA’nın püskürtülmesiyle tepkimeye girerek katılaşmasından yararlanılarak katmanlarda metal tozlarının bağlanması amaçlı kullanılmıştır (Wikipedia, 2019c). FA’nın kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. FA kimyasal özellikleri (Wikipedia, 2019c)

Özellik	Değer
Kimyasal Formül	C ₅ H ₆ O ₂
Molar Ağırlık	98,0 g/mol
Yoğunluk	1,128 g/cm ³
Erime Noktası	-29 C
Kaynama Noktası	170 C

3.1.3. Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat prototip cihazı

Numuneler “Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat Cihazı Tasarımı ve Prototip İmalatı” tezi kapsamında yapılan ve Şekil 3.3’de verilen BPMEİ prototip tezgahı ile imal edildi.



Şekil 3.3. BPMEİ Prototip Cihazı

Tezgâh;

- En az 200 μm katman kalınlığı,
- Kanallı tip toz serici,
- Inkjet tipi püskürtme kafası,
- Arduino sistemi ile kontrol sistemine sahiptir.

3.1.4. Uv kürleme aparatı

UV kürleme yapılacak numunelerin kürlenmesi Şekil 3.4'deki UV lambalar ile yapılmıştır.



Şekil 3.4. UV Lamba

Cihaz özellikleri;

- 4 x 9 W lambaya sahip olan,
- 365 nm dalga boyunda ışık yayan bir cihaz olmasıdır.

3.1.5. Kürleme fırını

SLA reçine ile yapılan imalatlarda her katman için UV ışık ile kürlemeden sonra, numunelere sıcaklık kürlemesi de yapıldı. Bu kürleme Şekil 3.5’de görülen Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) bünyesinde bulunan Protherm PLF 110/45 ısıtma fırınında gerçekleştirildi. Fırının özellikleri;

- 45 litre hacminin bulunması,
- En fazla 1100°C’ye kadar ısıtma yapması,
- $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık toleransına sahip olmasıdır.



Şekil 3.5. Kürleme İşleminin Yapıldığı Isıl İşlem Fırını

3.1.6. Helyum piknometresi

Helyum piknometresi, Arşimet’in akışkanların taşması prensibi ve Boyle Kanunu’nu temel alan bir yoğunluk ölçüm yöntemidir. Ölçümlerin doğruluğu ve en küçük gözeneklere kadar hesabın yapılabilmesi için, en uygun akışkanın Helyum gazı olduğu görülmektedir. Helyum’un ideal gaz davranışları da tercih sebebidir. Şekil 3.6’da helyum piknometresi görülmektedir (ODTÜ, 2019).



Şekil 3.6. Helyum Piknometresi

Numunelerin ham ve sinterlenmiş yoğunluklarının ölçümünde helyum piknometresi kullanılmıştır.

3.1.7. Sinterleme fırını

Sinterleme işlemi farklı sinterleme sıcaklıklarında, atmosfer kontrollü fırında yapıldı. Çalışmada sinterleme işleminde, Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTUAM) bünyesinde bulunan ve Şekil 3.7’de verilen fırın kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Sinterleme İşleminin Yapıldığı Atmosfer Kontrollü Fırın

Cihaz;

- 1700⁰C en yüksek sıcaklığa çıkabilen,
- 8 litre hacim,
- Fırının etrafında dolaşan kanallar ile su soğutması yapabilen,
- Atmosfer kontrolüne (argon, azot, vakum vb. ortamda işlem yapabilmesi) sahip bir fırındır.

3.1.8. Hassas kesme cihazı

Sinterlenmiş numunelerin iç bölgelerinin incelenmesi için önce kesilmesi gerekmektedir. Bunun için YETEM bünyesinde bulunan ve Şekil 3.8'deki ATM GMBH Brillant220 cihazı kullanıldı.



Şekil 3.8. Hassas Kesme Cihazı

Cihaz özellikleri;

- 0,005-3 mm/sn hızda kesme yapan,
- 0,1 mm hassasiyete sahip,
- 500-5000 rpm devir hızda çalışabilmektedir.

İmalatı yapılan numunelerin içyapı özelliklerinin incelenebilmesi için kesit alma işlemi yapılmıştır. Bu kesme işleminin yönü belirlenirken, katmanların durumlarını incelemek için katman yönüne dik bir kesme yüzeyi seçilmiştir.

3.1.9. Sıcak bakalit alma cihazı

Kesilen numuneler daha sonrasında sıcak bakalite alındı. Kesilen numuneler bakalite alınmasının amacı; mikro içyapı, mikrosertlik gibi incelemelerin daha rahat bir şekilde yapılabilmesi içindir. Şekil 3.9'da verilen ATM GMBH Opal 410 model cihaz kullanıldı.

Cihaz özellikleri;

- 30-40 mm kalıp boyu olan,
- 0-200°C arası çalışan,
- 450 bar'a kadar hidrolik basınç yapabilmesidir.



Şekil 3.9. Sıcak Bakalite Alma Cihazı

3.1.10. Zımparalama cihazı

Bakalite alınan numuneler, YETEM bünyesinde bulunan ATM GMBH Saphir 520 cihazında zımparalandı. Numuneler kesit alma işlemi sonrasında oldukça pürüzlü bir yüzeye sahip olurlar. Mikroskop altında odaklanma yapılabilmesi için yüzeyin zımparalanması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan zımpara cihazı Şekil 3.10'da verilmiştir. Zımpara cihazının özellikleri;

- 50-600 dev/dk dönme hızı aralığı,
- 200-250 mm tekerlek boyutuna sahip olmasıdır.



Şekil 3.10. Zımparalama Cihazı

3.1.11. Mikrosertlik ölçüm cihazı

Sinterlenen deney parçalarının mikrosertlik değerlerini bulmak için YETEM bünyesinde bulunan ve Şekil 3.11’de gösterilen TTS Matsuzawa HWMMT-X3 model cihaz kullanıldı. Cihazın özellikleri;

- Vickers cinsinden sertlik değeri vermesi,
- 50 $\mu\text{m}/\text{sn}$ yük uygulama hızı,
- 5-99 sn arası yük uygulama süresi,
- Standart 49,03-9807 mN kuvvet uygulama aralığı bulunmasıdır.

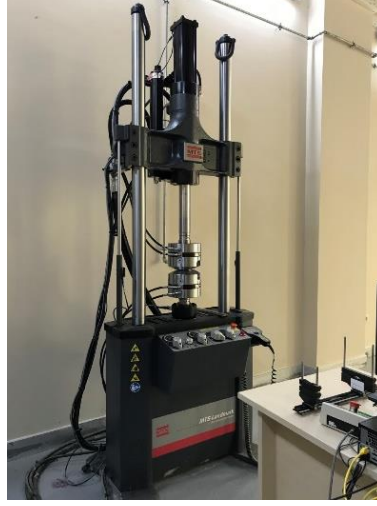


Şekil 3.11. Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

3.1.12. Basma deney cihazı

Numunelerdeki basma dayanımını bulmak için Şekil 3.12’de görülen ve YETEM bünyesinde bulunan Üniversal Çekme-Basma Deney Cihazı – MTS 370.10 modeli kullanıldı. Cihaz özellikleri;

- 100 kN’a kadar güç kapasitesi,
- Numune başına 10 dk işlem süresi
- İşlem öncesi 140-1283 mm, işlem sonrası 363-1753 mm numune boyları ile çalışabilmesidir.



Şekil 3.12. Basma Deney Cihazı

3.1.13. Çeker ocak

Dağlama işlemi, ortaya çıkan zehirli gazlardan etkilenmemek adına Şekil 3.13’de gösterilen YETEM bünyesinde bulunan Deltalab çeker ocağında yapılmıştır. Cihaz özellikleri;

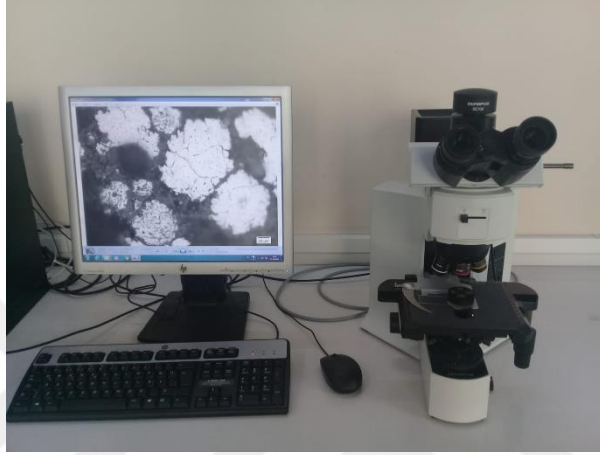
- 1000, 1250, 1750 devir/dk M3 Standart EN 60034-1 fan hızına sahip olması,
- Seramik epoksi derzli çalışma zeminine sahip olmasıdır.



Şekil 3.13. Çeker Ocak

3.1.14. Optik mikroskop

Dağlama işlemi sonrasında numelerin iç yapılarının incelenmesi için Şekil 3.14'deki Olympus BX51TRF-6 model optik mikroskop kullanılmıştır. Numunelerden; x5, x10, x20, x50 ve x100 büyütme oranlarıyla görüntüler alınmıştır.

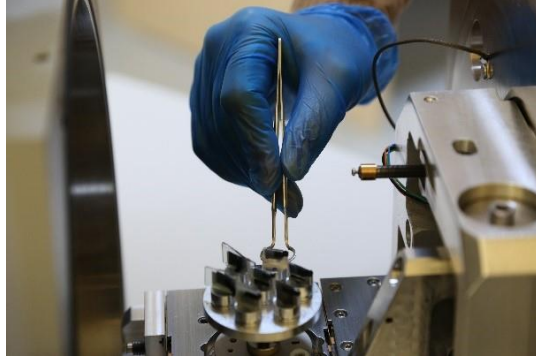


Şekil 3.14. Optik Mikroskop

3.1.15. Taramalı elektron mikroskobu

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), incelenen numunenin yüzey şekilleri ve malzeme kompozisyonu hakkında bilgi verir. SEM için Şekil 3.15'de görülen YETEM bünyesinde bulunan FEI QUANTA FEG 250 cihazı kullanılmıştır. Cihaz;

- FEG elektron tabancasına sahip,
- 1,4 nm çözünürlüğe duyarlı,
- 14 – 1.000.000x büyütme yapabilen bir mikroskoptur.



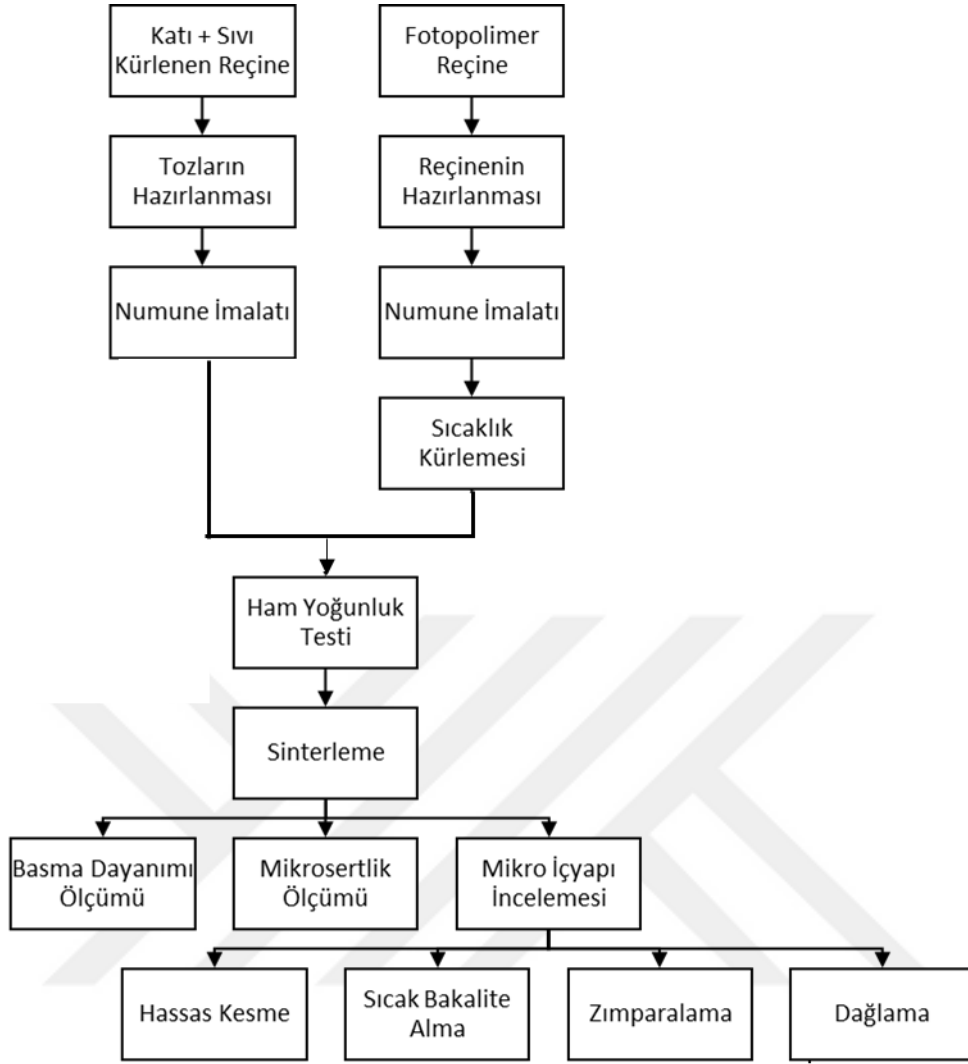
Şekil 3.15. Taramalı Elektron Mikroskobu

3.1.16. ImageJ programı

Optik mikroskop ile elde edilen görüntülerden, tane boyutlarının hesaplaması için ImageJ programı kullanılmıştır. ImageJ, Ulusal Sağlık Enstitüleri ile Optik ve Hesaplamalı Enstrümantasyon Laboratuvarı (LOCI, Wisconsin Üniversitesi) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu Java tabanlı bir görüntü işleme programıdır. Program toz tanelerinin renklerini analiz ederek, tane boyutu, tane çapı, doluluk oranı gibi değerlerin bulunmasını sağlamaktadır.

3.2. Metot

Tez kapsamında izlenen metot Şekil 3.16'da bulunan akış şemasında verilmiştir.



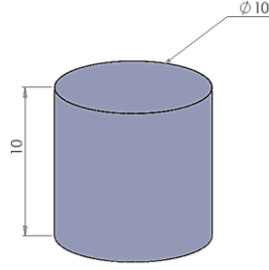
Şekil 3.16. Tez Kapsamında İzlenen Yol Haritası

3.2.1. Tozların hazırlanması

p-TSA ve FA ile imalatı yapılan katı + sıvı kürlenmiş reçineli imalat için tozlar karıştırılarak imalata hazır hale getirildi. Karışım oranı olarak ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 p-TSA/316L oranları seçildi.

3.2.2. Katı + sıvı kürlenmiş reçinelerle numune imalatı

Çalışma kapsamında mekanik özelliklerin inceleneceği numuneler Şekil 3.17'deki gibi $\phi 10 \times 10$ mm boyutunda silindirler şeklinde modellendi.



Şekil 3.17. İmal edilen numenin tasarımı

p-TSA ve 316L toz karışımı imalat tablası üzerine serildi ve FA, püskürtme kafası ile katman üzerine püskürtüldü. Katman kalınlığının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amacıyla üç farklı katman kalınlığında (200, 300, 400 µm) imalatlar gerçekleştirildi.

3.2.3. Reçinenin hazırlanması

Fotopolimer SLA reçinenin tozların üzerine püskürtüldüğü zaman nüfuziyet sorunu vardır. Tozları ıslatamamakta ve topaklaşarak toz katmanı üzerinde kalmaktadır. Bunun önüne geçmek amacıyla SLA reçine İPA ile seyreltilmiştir. Reçine ve seyrelticinin karışım oranları ise ağırlıkça;

- %20 SLA, %80 İPA (SLA-20),
- %30 SLA, %70 İPA (SLA-30),
- %40 SLA, %60 İPA (SLA-40),
- %50 SLA, % 50 İPA (SLA-50)

şeklindedir. Bu karışım oranlarının yapılmasından dolayı ağırlıkça SLA/316L oranları yaklaşık olarak sırasıyla; %4,9, %7,7, %10,7 ve %13,9 oranlarına denk gelmektedir.

3.2.4. Fotopolimer reçineli numune imalatı

Şekil 3.3'deki numune aynı tezgâhta SLA reçine ile de imal edildi. 316L tozu imalat alanına serildikten sonra ilgili katman geometrisine göre SLA reçine

püskürtüldü. Püskürtülen reçinenin sertleşmesi için UV ışık kaynağı katman üzerinde tutuldu. Bu işlemler tekrar edilerek 3 boyutlu numune imal edildi.

UV ışık kaynağının her bir katman üzerinde bekleme süresi için denemeler yapıldı. 10, 15, 30, 60, 120 saniye ile yapılan denemelerde istenen ham mukavemete ulaşamadı. Her bir katmanda 15 saniye kürleme yapıp, imalat bittikten sonra numunenin tamamının 30 dakika UV ışık altında bekletilmesi denendi. Bu denemeyle numunelerin dayanımda artış yaşandı. Ancak halen istenilen değerlere ulaşamamasından dolayı literatür (Taormina vd., 2018, Binnion ve Arts., 2016) bilgileri dikkate alınarak sıcaklık kürlemesinin yapılmasına karar verildi.

3.2.5. Sıcaklık kürlemesi

İncelenen literatürler (Taormina vd., 2018, Binnion ve Arts., 2016) ve yapılan denemeler sonucunda, SLA reçine ile imal edilen numuneler 175⁰C'de kürlendi. Süre açısından yapılan denemelerde 30, 60, 90 ve 120 dakika kürleme yapıldı. 120 dakika kürlenmiş numunelerde istenen ham mukavemet değerine ulaşıldı. Fırının hacminin büyük olması, sıcaklığın tüm fırın içinde homojen dağılması için, planlanandan daha uzun süre kürleme işlemi yapılmasını gerektirdi.

3.2.6. Ham parça yoğunluk oranı ölçümü

Ham parçaların yoğunluk oranı ölçümü helyum piknometresi ile yapılmıştır. Bu ölçümlerin amacı numunelerin ham haldeki yoğunluk oranlarının literatür ve parametreler arasında karşılaştırılmasını görmektir. Aynı zamanda sinterleme öncesi ve sonrasında yoğunluk değişiminin incelemesini yapmaktır.

3.2.7. Sinterleme

İmal edilen numuneler sinterlenmesinde üç farklı sıcaklıkta (1100, 1150 ve 1200⁰C) yapıldı. Fırının sıcaklık artış hızı literatüre (Vangapally vd.(2017), Do vd. (2017), Johnston vd., (2004), Gülsoy (2008)) uygun olarak 10⁰C/dk seçildi.

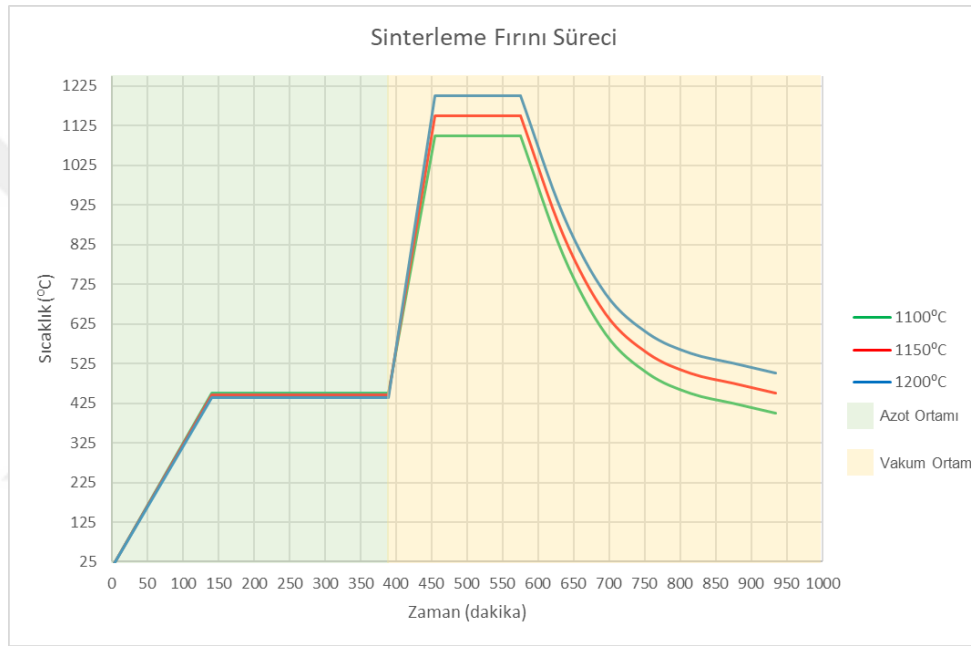
Bu parametreyle sinterleme yapıldığında reçinelerin uçurulamadığı ve numunelerin içinde kömürleştiği görüldü. Reçinelerin yanma durumuna geçmeden uçuşması için 450⁰C'ye kadar 3⁰C/dk sıcaklık artış hızı ile çıkılması, 450⁰C'de bir süre beklenip; 10⁰C/dk sıcaklık artış hızıyla sinterleme sıcaklığına çıkılacak şekilde sinterleme yapıldı. Bu işlem esnasında ön denemelerde sinterleme fırını 450⁰C'de 30, 60 ve 90 dakika bekletildi. Bekletilen fırın süreçlerinde 90 dakikanın yeterli olduğu görüldü. 450⁰C'de buharlaşan reçinenin kapalı fırın ortamında kaldığı ve soğuma sonrası tekrar numuneler üzerine yapıştığı görüldü. Bu yapışmayı önlemek amacıyla literatüre bakılarak (Vangapally vd.(2017), Do vd. (2017), Johnston vd., (2004), Gülsoy (2008)) fırın 450⁰C'de 90 dakika bekledikten sonra, azotla karışık reçine buharı vakum pompası ile fırın ortamında emildi. Kalan sinterleme sürecine vakum ortamında devam edildi. İncelenen literatürlerde numunelerin sinterleme sıcaklığında 2, 4, 5 saat bekletildiği görüldü (Vangapally vd.(2017), Do vd. (2017), Johnston vd., (2004), Gülsoy (2008)). Bu çalışmada 2 saat ve 3 saat bekletilerek denemeler yapıldı. Bu yapılan denemelerde 2 saatin yeterli olduğu tespit edildi. Çeliklerin yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye çok açık hale gelmesinden dolayı, fırının kapağı kapalı olarak soğutulmuştur. Sinterleme sıcaklığından 800⁰C'ye kadar fırının su devirdaim soğutma sistemiyle, 800⁰C'den 150⁰C'lere ise doğal olarak soğutulmuştur.

Tüm bu denemeler sonunda sinterleme işleminin basamakları;

- Numunelerin fırına yerleştirilmesi,
- Kapak kapatıldıktan sonra numunelerin oksitlenmesini engellemek amacıyla fırın ortamına azot gazı basılması,
- Sıcaklığın 3⁰C/dakika hız ile 450⁰C'ye getirilmesi,
- 450⁰C'de 90 dakika beklenmesi,
- 450⁰C'de 90 dakika beklendikten sonra vakum pompasıyla, ortamdaki azot ve reçine buharının çekilmesi,
- Üç farklı sıcaklığa (1100, 1150 ve 1200⁰C) 10⁰C/dk ısıtma hızı ile çıkılması,

- Bu üç farklı sıcaklıkta sinterlemenin gerçekleşmesi için 120 dakika beklenmesi,
- 120 dakika sonunda sinterleme işlemi tamamlandınc, 800°C'ye kadar fırının su soğutma sisteminden faydalanılması,
- 800°C'den sonra kapağı açılmadan doğal olarak soğumaya bırakılması adımlarından oluşmuştur.

Şekil 3.18'de fırın sürecinin sıcaklık-zaman grafiği verildi.



Şekil 3.18. Sinterleme Fırını Süreci

Sürecin bu şekilde ilerlemesi planlanırken 1150°C'de sinterlenmesi planlanan numunelerin fırınlanma sürecinin başlangıç aşamasında fırın bir anda 300-350°C'lere yükselmiş, daha sonra tekrar normal değerlerine inmiştir. Ancak bu yükseliş reçinenin bir kısmını yakmış, numunelerin istenilen şekilde sinterlenmesini engellemiştir. Bir diğer sorun ise vakum ortamında devam etmesi istenen fırın süreci, iyi vakumlama yapılamamasından dolayı istenilen fırın ortamı oluşamamış, reçine parça içerisinde uçurulamamıştır.

3.2.8. Numunelerin mikrosertlik ve mikro içyapı için hazırlanması

Numunelerin katmanları arasında oluşan içyapı özelliklerinin incelenmesi amacıyla, katman yüzeyine dik şekilde ortadan kesiti alındı. Numuneler kesilirken, testere 2500 dev/dk ile dönmüş ve 0,1 mm/sn ile ilerlemiştir. Kesit alma sırasında su-bor yağı karışımı sıvı kullanılmıştır.

Kesiti alınan yapılan numuneler, kesit yüzeyleri dışarıda kalacak şekilde sıcak bakalite alındı. Bakalitleme işlemi sırasında 4 dakikada 180⁰C'ye ısıtılmış ve 3 dakikada da oda sıcaklığına soğutulmuştur. Basınç olarak 150 Bar kullanılmıştır.

Bakalite alınan parçalar üzerinde istenilen çalışmaların yapılabilmesi için numuneler üzerine zımpara işlemi yapıldı. Parçalar sırası ile P150, P600, P1200, P1500 ve P2500 zımparalar ile zımparalandı. Her bir zımpara için su takviyesiyle 2 dakika süreyle işlemler yeterli düzgünlükte yüzey elde edene kadar tekrarlandı.

3.2.9. Mikrosertlik ölçümü

Her bir numune için rastgele belirlenmiş yerden 3 adet HV cinsinden ölçüldü, ölçümlerin ortalama değerleri alındı.

3.2.10. Basma dayanımı

Sinterleme işlemi tamamlanan parçalar basma cihazına uygun şekilde yerleştirilerek, kuvvet uygulandı. Numunelerin basma mukavemetleri MPa cinsinden ölçüldü.

3.2.11. Dağlama

Yeterli hassasiyette parlatılan numunelerin içyapılarını incelemek adına dağlama işlemi yapıldı. İşlem sırasında asit çözeltisine batırılan numuneler, çeşitli toksit gazlar ortaya çıkardığı için işlem çeker ocak altında yapıldı.

Dağlama işlemi için asit çözeltisi hazırlanmadan önce literatürdeki çalışmalar incelendi ve tezde kullanılan dağlama karışımıyla karşılaştırılması verilen Çizelge 3.5 oluşturuldu.

Çizelge 3.5. Dağlama Çözeltisi İçerikleri

Çalışma	Malzeme	1. Bileşen	2. Bileşen	3. Bileşen	4. Bileşen
Nandwana vd. (2016)	Inconel 718	HCl (1 birim)	AcOH (1 birim)	HNO ₃ (1 birim)	
Cheraghali vd. (2011)	316L	Saf Su (33 mL)	CuCl ₂ (1,5 g)	HCl (33 mL)	Etanol (33 mL)
Cheraghali vd. (2011)	316L	CuCl ₂ (5 g)	HCl (100 mL)	Etanol (100 mL)	
Cheraghali vd. (2011)	316L	Saf Su (190 mL)	HNO ₃ (5 mL)	HCl (3 mL)	HF (2 mL)
Cheraghali vd. (2011)	316L	Saf Su (92 mL)	HNO ₃ (6 mL)	HF (2 mL)	
Cheraghali vd. (2011)	316L	Etanol (100 mL)	HNO ₃ (1-10 mL)		
Cheraghali vd. (2011)	316L	CuSO ₄ (10 g)	HCl (50 mL)	Su (50 mL)	
Cheraghali vd. (2011)	316L	Etanol (100 mL)	C ₆ H ₃ N ₃ O ₇ (2-4 g)		
Tez Kapsamında	316L	Saf Su (15 mL)	HCl (15 mL)	HNO ₃ (20 mL)	

Yapılan denemeler sonucunda numuneler çizelgede verilen çözelti içeriğinde 15 sn bekletilmiş, sonrasında saf su ile durulanmıştır.

3.2.12. Mikro içyapı incelemesi

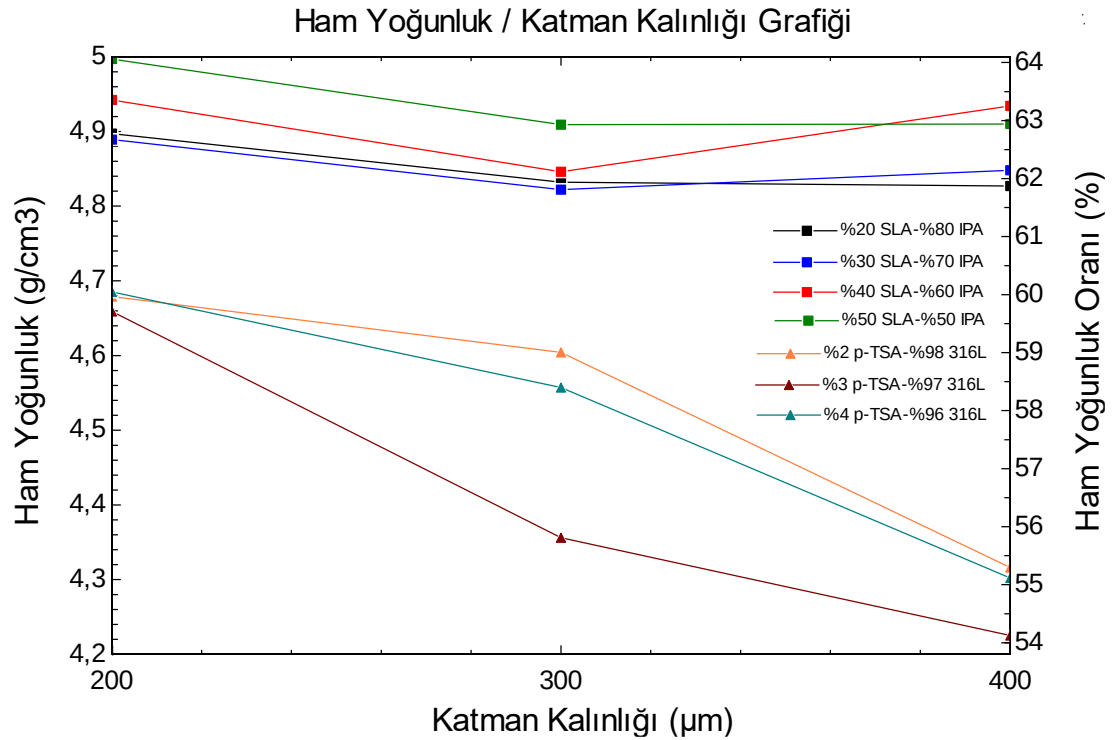
Optik Mikroskop ile malzemelerin iç yapısı incelenmiştir. İnceleme mikro içyapı görüntüleri kullanılarak mikro/makro boşluk ve çatlak olup olmadığı incelendi. Numunelerin sinterlenme davranışları, reçinelerin piroliz durumlarına bakıldı. İmageJ programı ile tane boyutlarına bakılmış, taramalı elektron mikroskobu ile malzemelerin kompozisyonları incelenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırma bulgularında numuneler ham ve sinterlenmiş yoğunluk oranları, basma dayanımı, mikrosertlik ve mikro içyapı açısından incelenmiştir. Parametrelerin numunelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine etkisi aşağıda anlatılmıştır.

4.1. Ham Yoğunluk Oranı

Numunelerin, Helyum Piknometresi yöntemi ile ölçülen ham yoğunluk değerleri Şekil 4.1'deki grafikte verildi. Grafik katman kalınlığı, reçine türü, reçine oranları bakımından değişimleri göstermektedir. Grafiğin sol tarafı ham yoğunluk değerini gösterirken, sağ tarafı yoğunluk oranını belirtmektedir. Sonuçlar her bir parametre için 3 farklı ölçümden alınan değerlerin ortalaması alınarak belirlendi. Ham yoğunluk değeri ölçülürken %1 p-TSA reçine kullanılan numuneler zarar gördüğü için ölçümleri yapılamadı. Az miktardaki reçine oranı, metal tozlarını bir arada tutamamış ve numuneler dağılmıştır.



Şekil 4.1. Ham Yoğunluk / Katman Yüksekliği Grafiği

Şekil 4.1'e bakıldığında; p-TSA ve FA katı + sıvı kürlenene reçineli numunelerin ham yoğunluğu; SLA reçine ile imal edilen numunelerin ham yoğunluğundan düşüktür.

SLA reçineli numunelerde katman kalınlığı arttıkça ham yoğunluk değeriinde çok düşük bir azalma yaşanırken (4,89 g/cm³'den 4,83 g/cm³'e); katı + sıvı kürlenene reçine için katman kalınlığı arttıkça, ham yoğunluk azalma eğilimi daha belirgin (4,66 g/cm³'den 4,23 g/cm³'e) şekilde görülmektedir.

SLA reçine ile imalat yapılırken, katman katman UV kürlenene numunelere, imalat sonrası sıcaklık kürlenmesi yapıldı. Bu sıcaklık kürlenmesi katman katman değil de numunenin tamamına aynı anda yapıldığı için, katman kalınlığının etkisini azalttığı kanaatine varılmıştır. Bu yüzden SLA reçineli numunelerde katman kalınlığının ham yoğunluğa etkisinin düşük olmasına neden olduğu değerlendirilmiştir.

%1 p-TSA orandaki reçine ile imal edilen numunelerde, metal tozlarını yeterince bağlama kabiliyeti göstermemiştir.

Elde edilen bilgilerle literatürle karşılaştırılması amacıyla Çizelge 4.1 hazırlanmıştır. Çalışmada elde edilen bulgularla literatürdeki veriler sinterlenme öncesindeki parçalardaki yoğunluk oranları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin Ham Mukavemet İçin Yoğunluk Oranları

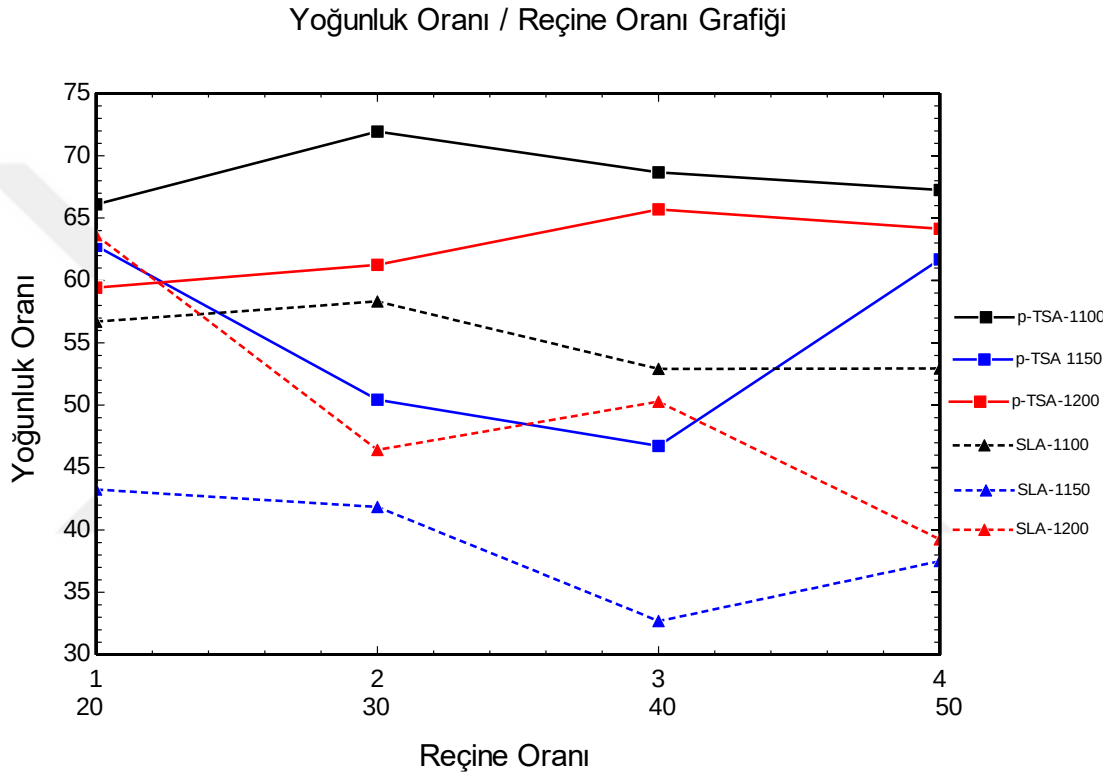
Çalışma	Kullanılan Malzeme	Yoğunluk Oranı
Lorenz vd. (2004)	SS316L	56,50
Miyanaji ve Yang (2016)	SS420	55,76
Enneti vd. (2018)	WC-%12Co	42
Do vd. (2017)	SS316L	56,41
Mustafaei vd. (2017)	Inconel 625	50-60
Do vd. (2018)	SS316L	50-63
SLA20 / 200 µm	SS316L	62,78
SLA20 / 300 µm	SS316L	61,95
SLA20 / 400 µm	SS316L	61,89
SLA30 / 200 µm	SS316L	62,68
SLA30 / 300 µm	SS316L	63,36
SLA30 / 400 µm	SS316L	62,15
SLA40 / 200 µm	SS316L	63,36
SLA40 / 300 µm	SS316L	62,13
SLA40 / 400 µm	SS316L	63,26
SLA50 / 200 µm	SS316L	64,06
SLA50 / 300 µm	SS316L	62,94
SLA50 / 400 µm	SS316L	62,95
p-TSA2 / 200 µm	SS316L	59,99
p-TSA2 / 300 µm	SS316L	59,03
p-TSA2 / 400 µm	SS316L	55,33
p-TSA3 / 200 µm	SS316L	59,73
p-TSA3 / 300 µm	SS316L	55,85
p-TSA3 / 400 µm	SS316L	54,17
p-TSA4 / 200 µm	SS316L	60,06
p-TSA4 / 300 µm	SS316L	58,42
p-TSA4 / 400 µm	SS316L	55,15

Literatür ile bulunan değerler karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. SLA30/300 µm, SLA40/200 µm, SLA40/400 µm, SLA50/200 µm değerleri literatürde yer alan değerlerin üzerinde çıkmıştır.

4.2. Yoğunluk Oranı

Ham yoğunluk ölçümleri bittikten sonra sinterleme işlemi (1100, 1150, 1200°C) yapıldı. Sinterleme işlemi tamamlanan numunelerin yoğunluk ölçümleri Helyum piknometresi ile yapıldı. Şekil 4.2’de yoğunluk değerlerinin reçine oranlarıyla değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe bakıldığında p-TSA ile imal edilen numunelerin yoğunlukları SLA ile imal edilenlere göre yüksektir. Buna sebep olarak, SLA’lı numunelerdeki yüksek oranda C ve O₂ (SEM ölçümlerinde ağırlıkça %12,67 C, %17,05 O₂) bulunması gösterilebilir. Yüksek C ve O₂ oranları reçinenin piroliz olmadığını ve numune içerisinde yanarak kül olarak

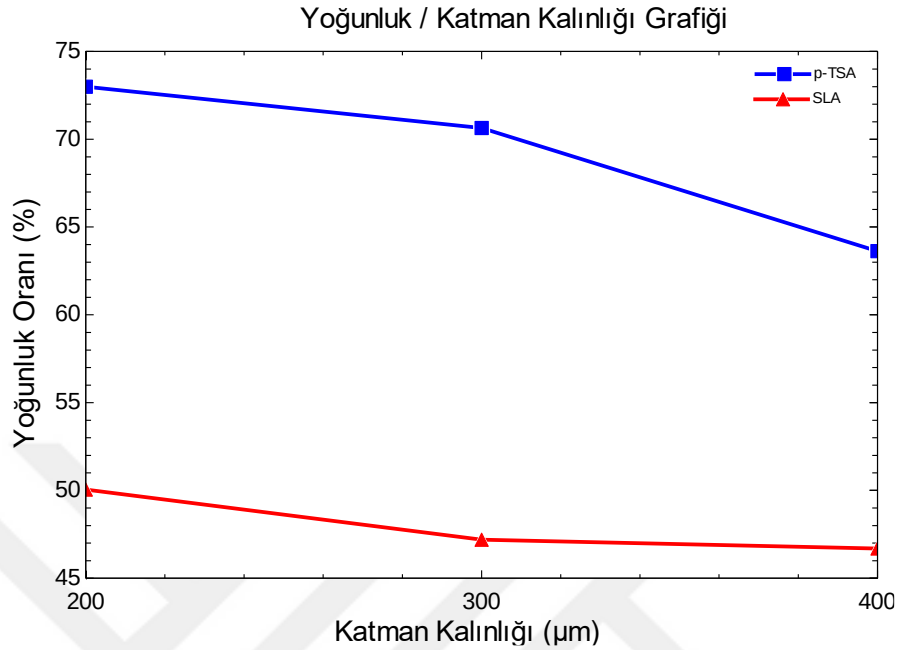
bulunduğu anlamına gelmektedir. p-TSA'lı numunelerde reçine oranı en azdan en fazlaya yoğunluk değeri %4 civarında azalırken, SLA numunelerin en az reçine oranından en fazlaya doğru yoğunluk değeri yaklaşık %21 azalmıştır. Sinterleme sıcaklığı ile yoğunluk arasındaki ilişki de grafikte gösterilmiştir. 1150⁰C'de sinterleme sürecinde yaşanan sorun yoğunluk değerlerine yansımıştır. Her iki reçine için de 1100⁰C'de sinterlenen numunelerin yoğunluğu 1200⁰C'de sinterlenenlere göre yüksektir.



Şekil 4.2. Yoğunluk/Reçine Oranı Grafiği

Şekil 4.3'de katman kalınlığının yoğunluk oranına etkisi gösterilmiştir. Katman kalınlığı arttıkça yoğunluk değeri azalmaktadır. p-TSA reçine için yoğunluk oranı 200 μ m'den 300 μ m'ye çıkarken %3, 300'den 400 μ m'ye çıkarken %10 azalmıştır. SLA reçineli numunelerin yoğunluk değeri 200'den 300 μ m'ye çıkarken %6, 300'den 400 μ m'ye çıkarken %1 azalmıştır. Her bir katmana püskürtülen reçine miktarı aynı olduğu için, katman kalınlığının az olması birim hacime düşen reçinenin oranının daha fazla olmasına neden olur. Sinterleme sürecinde vakumun iyi sağlanamaması reçinenin parça içerisinden uzaklaşamamasına neden olmuştur. Bu yüzden katman kalınlığı düşük olan

numunelerde reçinenin de kapladığı alandan dolayı yoğunluk yüksek çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Yoğunluk/Katman Kalınlığı Grafiği

Yoğunluk değerleri reçine oranları, katman kalınlığı ve sinterleme sıcaklığı açısından incelendi. Bu incelemeye göre; hem yoğunluk açısından daha yüksek değerlere sahip olan SLA reçineli numuneler, sinterleme sonrası daha az yoğunluğa sahiptir. Buna yukarıda bahsedildiği gibi numuneler içerisinde bulunan C ve O₂ (reçinenin yanmasından dolayı yapıda oluşan elementler) neden olmuş yorumu yapılabilir. Reçine oranı p-TSA ve SLA arttıkça, yoğunluk azalmıştır. Katman kalınlığı arttıkça her iki reçine de, yoğunluk değeri azalmıştır. Sinterleme sıcaklığı açısından 1150°C en düşük sonuçları vermiştir. Bu sorunun nedeni 1150°C'lik işlem sırasında, ilk saniyelerde fırının bir anda yüksek sıcaklıklara çıkmış olma hatası gösterilebilir.

Elde edilen bilgilerle literatürle karşılaştırma amacıyla Çizelge 4.2 hazırlanmıştır. Çalışmada elde edilen bulgularla literatürdeki veriler sinterlenme sonrası parçalardaki yoğunluk oranları verilmiştir.

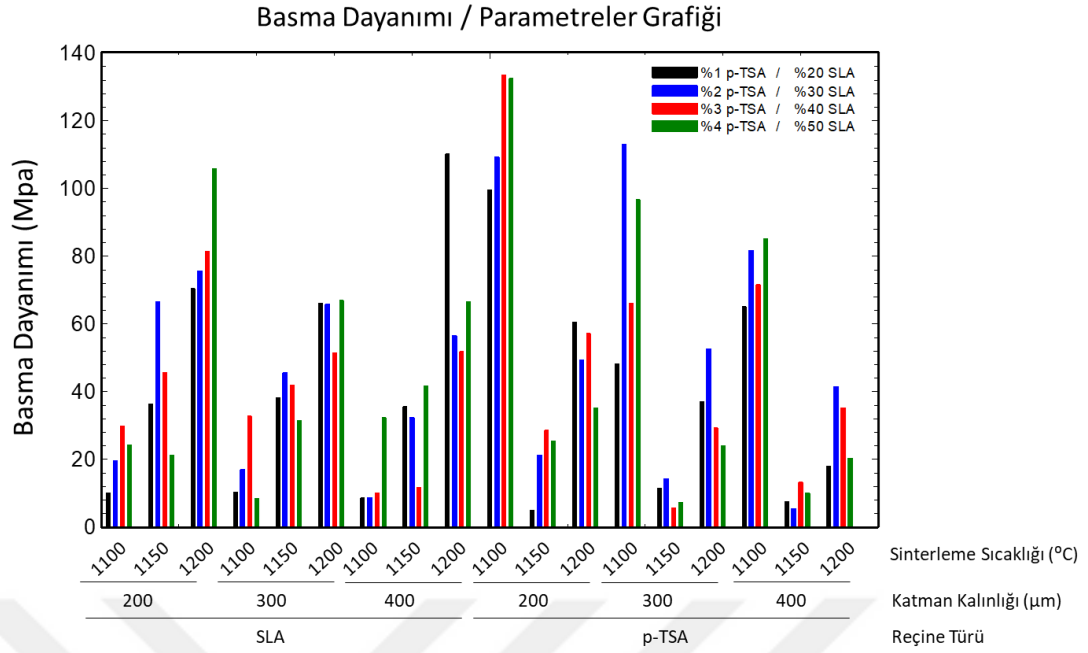
Çizelge 4.2. Sinterlenmiş Numuneler İçin Yoğunluk Oranları

Çalışma	Kullanılan Malzeme	Sinterleme Sıcaklığı	Sinterleme Süresi	Sinterleme Ortamı	İnfiltrasyon	Yoğunluk Oranı
Enneti vd. (2018)	WC-%12Co	1435-1485	45 dk	Argon ve Vakum	Var (Cu)	92-94
Do vd. (2017)	SS316L(B,BN, BC)	1150-1350	-	Argon ve Vakum	Yok	75-99
Mostafaei vd. (2017)	Inconel 625	1225-1380	4 saat	Vakum	-	95-99,2
Turker vd. (2018)	Inconel 718	1260-1300	2 saat	-	Yok	88-99
Do vd. (2018)	SS316L	1150-1350	-	Argon ve Vakum	Yok	71-99,43
SLA	SS316L	1100	2 saat	Azot – Vakumsuz	Yok	55,22
SLA	SS316L	1150	2 saat	Azot – Vakumsuz	Yok	38,82
SLA	SS316L	1200	2 saat	Azot – Vakumsuz	Yok	49,89
p-TSA	SS316L	1100	2 saat	Azot – Vakumsuz	Yok	76,1
p-TSA	SS316L	1150	2 saat	Azot – Vakumsuz	Yok	61,56
p-TSA	SS316L	1200	2 saat	Azot – Vakumsuz	Yok	67,59

Literatür ile karşılaştırıldığında, numunelere herhangi bir infiltrasyon veya vakumlu sinterleme işlemi yapılmadığı için, yoğunluk oranları düşüktür. Bazı çalışmalarda ise (Enneti vd. (2018), Do vd. (2017)) toz ham madde içerisine farklı malzeme tozlar eklenerek yoğunluk değerleri artırılmıştır.

4.3. Basma Dayanımı

Basma dayanımının parametrelere göre değişimi Şekil 4.4’de verilmiştir. p-TSA ile imal edilen numunelerin basma dayanımları, SLA reçine ile imal edilen numunelere göre daha yüksektir. En iyi basma dayanımı değeri p-TSA ile %3 p-TSA/metal tozu oranında, 1100°C’de sinterlenen ve 200 µm katman kalınlığında imal edilen numunede elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Basma Dayanımı/Parametreler Grafiği

Katman kalınlığının artmasıyla birlikte genel olarak basma dayanımının düştüğü görülmektedir. Düşüş 200 μm'de 300 μm'ye çıkıldığında çok fazlayken (p-TSA için %33, SLA için %19), 300 μm'den 400 μm'ye çıkıldığında daha az olmuştur (p-TSA için %5, SLA için %8). Yoğunluk oranı değeri de katman kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Basma dayanımı ve yoğunluk oranı değerlerinin her ikisinin de katman kalınlığı arttıkça azalmasından dolayı, yoğunluk ile basma dayanımı arasında doğru bir orantı olduğu yorumlanmıştır.

Basma dayanımının sinterleme sıcaklığı ile değişiminde en iyi sonuç 1100°C'de sinterlenen p-TSA numunelerinde elde edilirken, en düşük sonuç 1150°C'de sinterlenen p-TSA parçalarında görülmüştür.

İncelenen sonuçlara göre; katman kalınlığının artması basma dayanımını her iki reçine için de azaltmaktadır. Katı + sıvı kürlenene reçine 1100, UV kürlenene reçine 1200°C'de sinterlenince en iyi sonuçları vermiştir. Reçine oranının artması ya da azalması net bir sonuç ortaya koymamıştır. Katı + sıvı kürlenene reçinelerin basma dayanımı genel olarak UV kürlenene göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Çizelge 4.3'de literatürdeki çalışmalar ile elde edilen basma dayanımı sonuçların karşılaştırması verilmiştir.

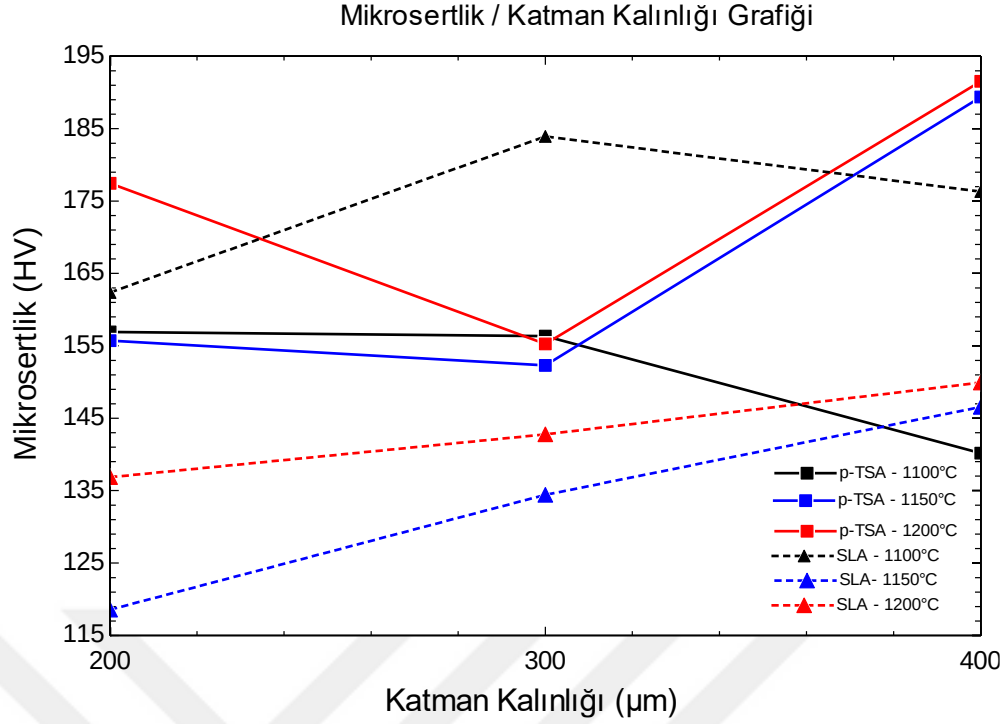
Çizelge 4.3. Basma Dayanımı Değerleri

Çalışma	Kullanılan Malzeme	Piroliz	Sinterleme	Basma Dayanımı (MPa)
Vangapally vd. (2017)	316L	-	1100 ⁰ C'de 2 saat	24,1
Vangapally vd. (2017)	316L	-	1200 ⁰ C'de 2 saat	852,2
Vangapally vd. (2017)	316L	-	1100 ⁰ C'de 4 saat	981,4
Vangapally vd. (2017)	316L	-	1200 ⁰ C'de 4 saat	1090,7
Tang vd. (2016)	316L	625 ⁰ C'de 90 dakika	1100 ⁰ C'de 2 saat	293
Tezde p-TSA	316L	450 ⁰ C'de 150 dakika	1100 de 2 saat	91,91
Tezde p-TSA	316L	450 ⁰ C'de 150 dakika	1150 de 2 saat	12,32
Tezde p-TSA	316L	450 ⁰ C'de 150 dakika	1200 de 2 saat	38,41
Tezde SLA	316L	450 ⁰ C'de 150 dakika	1100 de 2 saat	17,69
Tezde SLA	316L	450 ⁰ C'de 150 dakika	1150 de 2 saat	37,42
Tezde SLA	316L	450 ⁰ C'de 150 dakika	1200 de 2 saat	72,44

Basma dayanımı literatür ile karşılaştırıldığında düşük çıkmıştır. Buna neden olarak sinterleme işlemi sırasında vakumun iyi yapılamaması ve reçinenin parçadan yeterince uzaklaştırılamaması neden olduğu düşünülmüştür. Parça içerisinde kalan reçineler numunelerin basma dayanımlarına olumsuz etki yaptığı yorumlanmıştır.

4.4. Mikrosertlik

Mikrosertlik değerlerinin katman kalınlığı ve sinterleme sıcaklığına göre değişim grafiği Şekil 4.5'de verilmiştir. En yüksek değer SLA reçinede 400 mikronda iken, en düşük değer 200 mikronda p-TSA reçinedir. Şekilde ayrıca mikrosertlik değerinin sinterleme sıcaklığı ile değişimi verilmiştir. 1150⁰C'de yaşanan fırın sürecindeki sorunun değerlere yansıdığı görülmektedir. SLA reçineli numunelerin sertlik değerleri daha yüksektir.



Şekil 4.5. Mikrosertlik/Katman Kalınlığı Grafiğı

Literatürde bulunan değerler ile çalışmada bulunan sertlik sonuçları karşılaştırma amacıyla Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

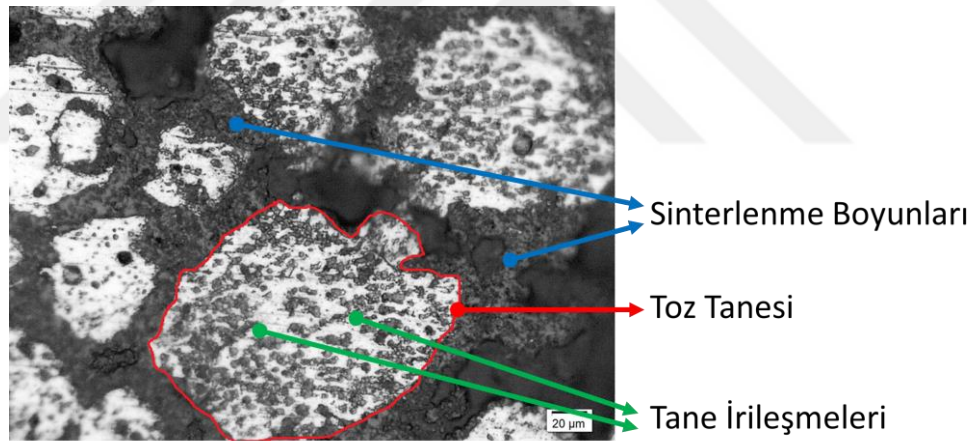
Çizelge 4.4. Mikrosertlik Değerleri

Çalışma	Kullanılan Malzeme	Sinterleme Sıcaklığı	Mikrosertlik (HRV)
Frykholm vd. (2016)	316L	1380	~107 (60 HRB)
Frykholm vd. (2016)	316L (kabuk)	1380	~ 112 (62 HRB)
Nastac vd. (2017)	316L	-	~ 118 (66 HRB)
Nastac vd. (2017)	SLE 316L	-	~142 (77 HRB)
Nastac vd. (2017)	MIM 316L	-	~121 (67 HRB)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 B)	1150	~346 (68 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 B)	1250	~547 (77 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 B)	1350	~547 (77 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 BN)	1150	~468 (74 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 BN)	1250	~468 (74 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 BN)	1350	~899 (85 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 BC)	1150	~578 (78 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 BC)	1250	~734 (82 HRA)
Do vd. (2017)	316L (%0,5 BC)	1350	~734 (82 HRA)
Tezde p-TSA	316L	1100	151,14
Tezde p-TSA	316L	1150	133,18
Tezde p-TSA	316L	1200	143,19
Tezde SLA	316L	1100	174,18
Tezde SLA	316L	1150	165,79
Tezde SLA	316L	1200	174,74

Çizelge 4.4’de verilen değerler incelendiğinde numunelerde elde edilen sertlik değerlerinin literatürde bulunanların üstünde olduğu görülmüştür. Literatüre bakıldığında genellikle HRB ve HRA cinsinde ölçüm yapılması; ölçüm yöntemi farklılıklarından kaynaklanan değişiklik yaratmış olabileceği göz önüne alınmalıdır. Bazı çalışmalara göre yüksek olan sertlik değerleri, bazı çalışmalara göre de çok düşük kalmıştır. Do vd. (2017) 316L paslanmaz tozunun içine karıştırdıkları B, BN ve BC ile sertlik değerlerini oldukça yükseltmişlerdir.

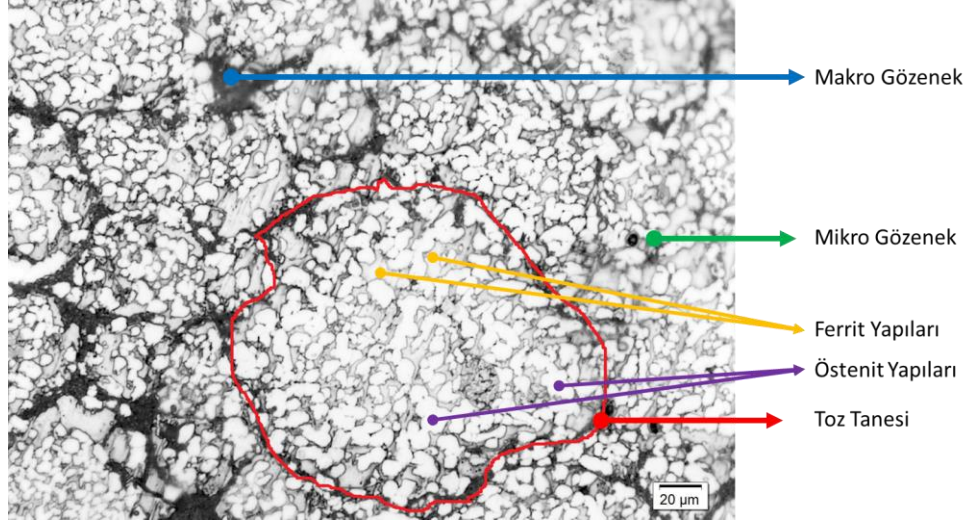
4.5. Mikro İçyapı

Mikroskop altında incelenen görüntülerde numunelerin içyapıları incelenmiştir. Şekil 4.6’da toz tanelerinin yapısı, sinterlenme boyunları görülmektedir. Oluşan boyunlar yapılan işlemin başarılı olduğunu, toz tanelerinin birbirine tam istenilen seviyede olmasa da kaynaştığını göstermektedir.



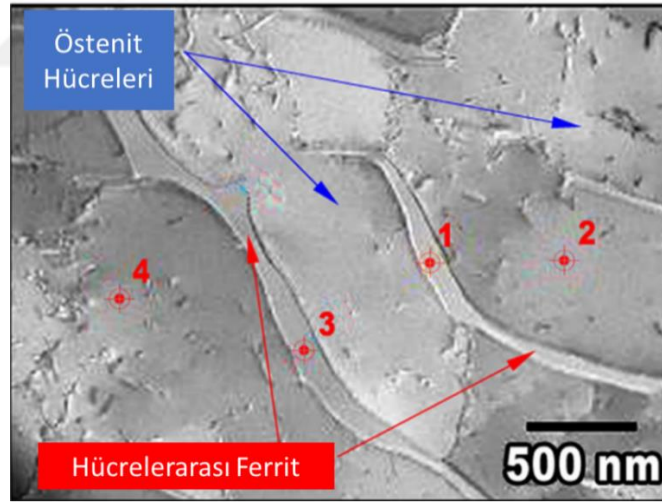
Şekil 4.6. Toz Tanesi, Sinterleme Boyunları ve İri Taneli Yapılar

Şekil 4.7’de mikro ve makro gözenekler, ferrit ve östenit yapıları görülmektedir. Mikro gözenekler tozun yapısından, nedeni belli olmayan sebeplerden oluşabilmektedir. Makro gözenekler ise; reçinenin buharlaşmasından, toz tanelerinin iyi sıkıştırılmamasından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 4.7. Makro/Mikro Gözenekler ve Ferrit/Östenit Yapıları

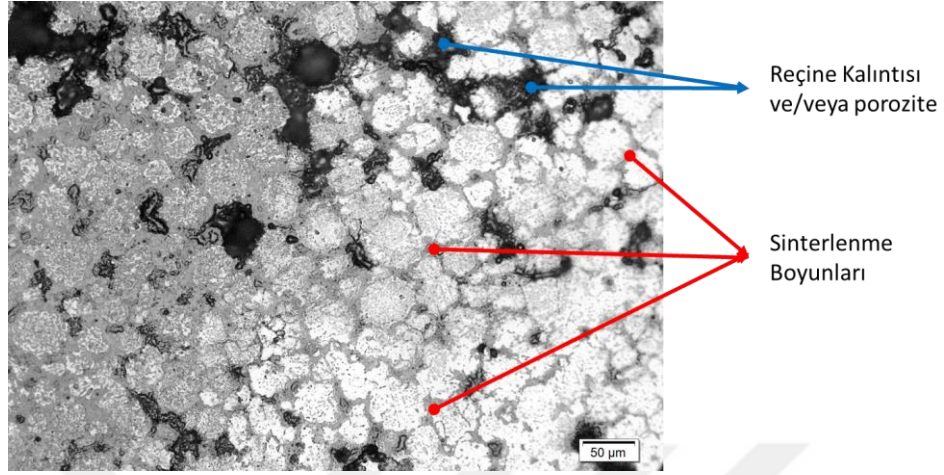
Şekil 4.8'de ise literatürde yapılan bir çalışmadan (Zietala vd. 2016) ferrit ve östenit yapı görüntüleri verilmiştir. Çalışmada daha yakından verilmiş olan mikroskop görüntüsünde tezde olduğu gibi östenit hücreleri ve hücrelerarasında bulunan ferrit yapıları görülmektedir.



Şekil 4.8. 316L Östenit ve Ferrit Yapıları (Zietala vd. 2016)

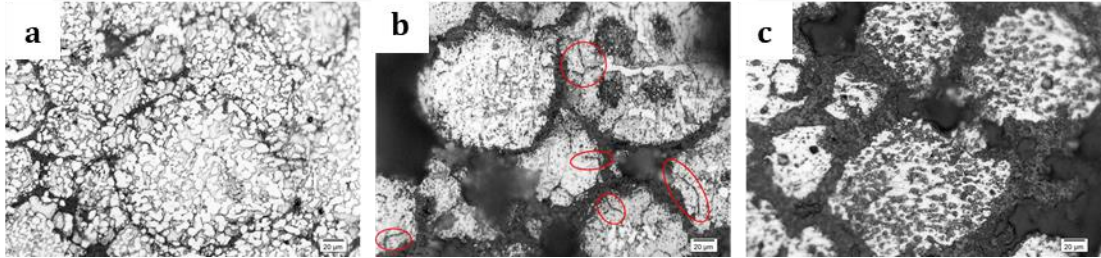
Atmosfer kontrollü fırın ortamında ilk başta azot ortamı parçanın oksitlenmesini engeller. Fırının 450°C'lere gelmesiyle reçine buharlaşmaya başlar ve azot gazıyla karışır. Bu andan sonra vakum pompası çalıştırılarak azotla karışık reçine buharı ortamdan uzaklaştırılır. Vakumun iyi yapılamadığı

durumlarda ise Şekil 4.9'da görüldüğü gibi reçine kalıntıları parça içerisinde kalabilir.



Şekil 4.9. Sinter Boyunları ve Reçine Kalıntıları

Şekil 4.10'da ise 1150°C'de sinterlenen numunelerin ısıtma işlemi esnasında ani sıcaklık artışının etkisi görülmektedir. 1100 ve 1200°C'deki numunelerde mikro çatlaklar görünmezken; 1150°C'de sinterlenen numunede oldukça fazla yer almaktadır.



Şekil 4.10. (a)1100, (b)1150, (c)1200°C sinterlenen numuneler

ImageJ programı kullanılarak sinterleme sıcaklığı ve reçine türüne göre tane boyutları ve çatlak durumları değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Tane boyutları alınırken 5 numuneden alınan ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 4.5. Ortalama Tane Boyutu ve Çatlak Durumu

Reçine Tipi	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Ortalama Tane Boyutu (µm ²)	Çatlak Durumu
SLA + İPA	1100	85210	Yok
	1150	156052	Var
	1200	371260	Yok
FA + p-TSA	1100	75756	Yok
	1150	43908	Var
	1200	337689	Yok

Elde edilen değerlerde sinterleme sıcaklığının artışının, literatüre benzer şekilde (Stawarczyk vd., 2012, Gupta 1972) tane boyutlarını artırdığı, 1150°C'de düşüş yaşayan FA + p-TSA değeri dışında değerlerin her iki reçine için yakın ve aynı doğrultuda değiştiği görülmüştür.

SEM incelemeleri sonucunda sinterleme sonrası her içine reçine için de kompozisyon miktarları elde edilmiştir. Çizelge 4.6'da çalışmada kullanılan 316L tozu, SLA ve FA+p-TSA reçineler için elementlerin ağırlıkça miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.6. 316L tozu, SLA ve FA+p-TSA'lı numunelerin kompozisyon oranları

Element \ Reçine	316L	SLA + İPA	FA + p-TSA
C	0	12,67	5,41
O	1,52	17,05	2,95
Si	0,85	0,81	0,87
Mo	1,5	1,33	2,98
Cr	17,55	15,43	10,31
Mn	2,24	2,31	0,57
Ni	11,16	6,68	11,71
Fe	Denge	Denge	Denge

SLA reçine ile imal edilen numuneler içerisinde C ve O oranı, p-TSA ile imal edilenlere göre yüksektir. Bu da parça içerisinde reçinenin daha az buharlaşmasını ve yapı içerisinde yanarak kül olmasını göstermektedir. Parça içerisinde bulunan kül yapısının artması, numunelerin mukavemet değerlerini de düşürmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında BPMEİ yönteminde imalatı yapılan 316L paslanmaz çelik tozları için; reçine türü, reçine oranı, katman kalınlığı, sinterleme sıcaklığı ile ilgili parametreler incelendi. Hangi parametreler ile yoğunluk, basma dayanımı, mikrosertlik, mikro içyapı analizlerinde daha iyi sonuçlar verdiğinin değerlendirmesi yapıldı.

Yapılan çalışmada, ham yoğunluk değerleri açısından literatür ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. SLA reçine ile imal edilen numunelerin ham yoğunluk oranları, p-TSA ve FA ile imal edilen numunelerin ham yoğunluk oranlarından yüksektir.

Sinterlenmiş yoğunluk değerleri herhangi bir infiltrasyon veya basınçlı sinterleme yapılmadığı için diğer çalışmalara göre düşüktür. Ham yoğunluk oranlarının tersine p-TSA ve FA ile imal edilen numunelerin sinterlenmiş yoğunluk değerleri, SLA reçineye göre daha yüksektir. SLA ile imal edilen numunelerin SEM analizi ile kompozisyonları incelendiğinde C ve O oranlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu da parçanın yoğunluğunu düşürmektedir.

1150⁰C'deki fırın sürecinde yaşanan ani ısınma ve soğuma numunelerde mikro çatlaklar oluşmasına ve bazı mekanik özelliklerin düşük olmasına neden olmuştur. Ayrıca fırında vakum işleminin iyi yapılamaması reçineyi ortamdan uzaklaştıramamış, numuneler içerisinde reçinenin kalmasına ve yüksek sıcaklıklarda yanarak kül bırakmasına neden olmuştur.

Basma dayanımı değerleri, mevcut çalışmalara göre düşük çıkmıştır. Bunun nedeni olarak fırının vakumlanmaması ve buharlaşan reçinenin ortamdan uzaklaştırılmayarak yanmasıdır. Ama önceki çalışmalarla benzer şekilde basma dayanımı sinterleme sıcaklığı arttıkça artmaktadır.

Mikrosertlik değerleri literatür ile karşılaştırıldığında 316L ile imal edilen numunelere göre yüksektir. Ancak bazı çalışmalarda metal tozlarının arasına

eklenen farklı tozlar ile yapılan numunelerin sertlik değerleri, elde edilen sonuçlara göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Mikro içyapıya bakıldığında, toz taneleri arasında sinterlemenin başarılı olduğu, yüksek sıcaklıklarda daha büyük tanelerin olduğu görülmüştür. Tane içerisindeki ferrit ve östenit yapıları elde edilmiş, makro ve mikro gözeneklerin tespiti yapılmıştır. Mikro gözenekler toz yapısındaki bir kusur, bilinmeyen bir sebep, sinterleme anındaki bir durumdan oluşmuş olabilirken; makro gözenekler reçineleri buharlaşmasından geriye kalan boşluklar veya tozların serilirken iyi sıkıştırılmamasının sonucu olabilmektedir.

Bu alanda yapılacak sonraki çalışmalar için;

- Daha düşük katman kalınlıkları ile çalışmalar yapılması,
- Farklı toz elek aralığındaki tozların birbirleriyle karıştırılarak imalatlar yapılması,
- Çeşitli sıcaklıklarında numunelerin sinterlemesi,
- Düşük reçine oranlarının denenmesi,
- Vakum şartları olan bir sinterleme fırını kullanılması,
- Numunelere SİP veya infiltrasyon yapılarak, gerçek mukavemet, doluluk ve sertlik gibi değerlerin llmesi,
- Yine aynı şekilde bu değerlerin artırılması için toz ham madde içerisine B, BC, BN, Co gibi malzemelerin çeşitli oranlarda karıştırılarak imalat yapılması

tavsiye edilebilir.

KAYNAKLAR

- 3D Durak, 2019. Erişim Tarihi: 21.10.2019. <https://3durak.com/sla-recine-3d-baski-teknolojisi/>
- 3D Print Expo. Erişim Tarihi: 21.02.2019. <https://3d-expo.ru/en/article/izgotovlenie-obektov-metodom-laminirovaniya-lom-78841>
- "3-D system uses lasers to make models from metal", Electronic Engineering Times, April 20, 1987.
- Additive Manufacturing Research Group. About Additive Manufacturing. Erişim Tarihi: 18.02.2019. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- Arcam, 2019. Erişim Tarihi:10.10.2019. <http://www.arcam.com/>
- Bai, Y., Williams, C.B., 2015. An Exploration of Binder Jetting of Copper. Rapid Prototyping Journal, 21(2), 177-185.
- Bansal, V., Bhandari, H., Bansal, M. C., & Dhawan, S. K. (2009). Electrical and optical properties of poly (aniline-co-8-anilino-1-napthalene sulphonic acid)—A material for ESD applications.
- Bartolo, P. J., & Gaspar, J. (2008). Metal filled resin for stereolithography metal part. CIRP annals, 57(1), 235-238.
- Binnion, J., & Arts, J. B. M. A New Method for Preparing 3D Acrylic Photopolymer Patterns for Investment Casting. In The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2016.
- Bredt, J.F., Anderson, T., 1999. Method of Three Dimensional Printing, United States Patent, No: 5,902,441 dated 11.05.1999.
- Bredt, J.F., Clark, S., Gilchrist, G., 2006. Three Dimensional Printing Material System and Method, No: US 7,087,109 B2 dated 08.08.2006.
- Brown, L. H., & Watson, D. D. (1971). U.S. Patent No. 3,594,345. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Cheraghali, R., Moradi, S., Ghoranneviss, M., Azar, P. A., & Khorrami, S. A. (2011). Etching of 316L Stainless Steel by Different Chemical Etchant Solutions for the Growth of Carbon Nanotubes by Thermal Chemical Vapour Deposition. Asian Journal of Chemistry, 23(7), 2833.

- Cima, M., Sachs, E., Fan, T., Brett, J.F., Michaels, S.P., Khanuja, S., Lauder, A., Lee, S.J.J., Brancazio, D., Curodeau, A., Tuerck, H., Three-Dimensional Printing Techniques, United States Patent, No: 5,387,380 dated 07.02.1995.
- Ciraud, P., 1973. "Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus beliebigem schmelzbarem Material", German patent application no: DE 2263777.
- Cordero, Z. C., Siddel, D. H., Peter, W. H., & Elliott, A. M. (2017). Strengthening of ferrous binder jet 3D printed components through bronze infiltration. *Additive Manufacturing*, 15, 87-92.
- Deckard C., 1989. "Method And Apparatus For Producing Parts By Selective Sintering", US Patent no: 4,863,538.
- Desktop Metal, 2019. Erişim Tarihi: 1.10.2019 <https://www.desktopmetal.com/>
- Digital Metal, 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://digitalmetal.tech/>
- Do, T., Bauder, T. J., Suen, H., Rego, K., Yeom, J., & Kwon, P. (2018, June). Additively Manufactured Full-Density Stainless Steel 316L with Binder Jet Printing. In ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference (pp. V001T01A017-V001T01A017). American Society of Mechanical Engineers.
- Do, T., Kwon, P., & Shin, C. S. (2017). Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 121, 50-60.
- Doyle, M., Agarwal, K., Sealy, W., & Schull, K. (2015). Effect of layer thickness and orientation on mechanical behavior of binder jet stainless steel 420+ bronze parts. *Procedia Manufacturing*, 1, 251-262.
- Duman, B., & Kayacan, M. C. SEÇMELİ LAZER SİNERLEME TEZGÂHI İÇİN İMALAT YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 27-45.
- Enneti, R.K., Prough, K.C., Wolfe, T.A., Klein, A., Studley, N., Trasorras, J.L., 2018. Sintering of WC-12%Co Processed by Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Technology, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 71, 28–35.
- EOS., 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://www.eos.info/en>
- Exone., 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://www.exone.com/>
- FAMODIMU OH. Additive manufacturing of aluminium-metal matrix composite developed through mechanical alloying (doctora's thesis). Wolverhampton. 2016. <https://www.wlv.ac.uk/>

- Feygin M., 1987. "Apparatus and method for forming an integral object from laminations", US patent no: 4,752,352.
- FRYKHOLM, R., TAKEDA, Y., ANDERSSON, B. G., & CARLSTRÖM, R. (2016). Solid state sintered 3-D printing component by using inkjet (binder) method. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 63(7), 421-426.
- Fu, Y., Liu, H., & Zhong, W. H. (2010). Wetting characteristics of epoxy resins modified by graphitic nanofibers with different functional groups. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 369(1-3), 196-202.
- Godlinski, D., Movan, S., 2005. Steel Parts with Tailored Material Gradients by 3D-Printing Using Nano-Particulate Ink, *Materials Science Forum*, 492-493, 679-684.
- Grau, J.E., Uhland, S.A., Moon, J., Cima, M.J., Sachs, E.M., Controlled Cracking of Multilayer Ceramic Bodies, *Journal of the American Ceramic Society*, 82(8), 2080-2086.
- Gupta, T. K. (1972). Possible correlation between density and grain size during sintering. *Journal of the American Ceramic society*, 55(5), 276-277.
- Gülsoy, H. Ö. (2008). Production of injection moulded 316L stainless steels reinforced with TiC (N) particles. *Materials Science and Technology*, 24(12), 1484-1491.
- Hague, R., Mansour, S., Saleh, N., & Harris, R. (2004). Materials analysis of stereolithography resins for use in rapid manufacturing. *Journal of materials science*, 39(7), 2457-2464.
- He, L., Li, D., Wang, K., Suresh, A. K., Bellare, J., Sridhar, T., & Wang, H. (2011). Synthesis of silicalite-poly (furfuryl alcohol) composite membranes for oxygen enrichment from air. *Nanoscale research letters*, 6(1), 637.
- Housholder R. F., 1981. "Molding Process", US patent no: 4,247,508.
- Hrabe, N., Gnäupel-Herold, T., & Quinn, T. (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 94, 202-210.
- Hull C., 1986. "Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", US patent no: 4,575,330.
- Johnston, S., Frame, D., Anderson, R., & Storti, D. Strain Analysis of Initial Stage Sintering of 316L SS Three Dimensionally Printed (3DP™) Components.

- Karapatis N. P., Guidoux Y., Gygax P. E., Glardon R., 1998. "Thermal behavior of parts made by direct metal laser sintering", In Proceedings of 8th SFF Symposium, 79-87.
- Khaing M.W., Fuh J.Y.H., Lu L., 2001. "Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts", Journal of Materials Processing Technology, 11, 269-272.
- Kocaeli Makine., 2019. Erişim Tarihi: 10.11.2019 <http://www.kocaelimakine.com/dokuman/pisirmeksizin-sertlesen-maca-yontemleri.pdf>
- Kruger T., Manners C. R., Nguyen H. D., 1999. "Simplified stereolithographic object formation methods of overcoming minimum recoating depth limitations", US patent no: 5,902,538.
- Lee, K. W., Wang, S., Fox, B. C., Ritman, E. L., Yaszemski, M. J., & Lu, L. (2007). Poly (propylene fumarate) bone tissue engineering scaffold fabrication using stereolithography: effects of resin formulations and laser parameters. Biomacromolecules, 8(4), 1077-1084.
- Lorenz, A.M., Sachs, E.M., Allen, S.M., 2004. Techniques For Infiltration of a Powder Metal Skeleton by a Similar Alloy With Melting Point Depressed, United States Patent, No: US 6,719,948 B2 dated 13.04.2004.
- Lowa Z, Chuaa YT, Rayb BM, Mattiaa D, Metcalfeb IS, Pattersona DA. Perspective on 3d printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. Journal of Membrane Science. 2017:596-613
- Lu, B., & Li, N. (2015). Versatile aluminum alloy surface with various wettability. Applied Surface Science, 326, 168-173.
- Mandorf, V. (1988). U.S. Patent No. 4,735,974. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Matmatch (2019), Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://matmatch.com/materials/>
- Miyanaji, H., Yang, L., 2016. Equilibrium Saturation in Binder Jetting 3D Printing Process: Theoretical Model vs. Experimental Observations.
- Mostafaei, A., Toman, J., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Krimer, Y. L., & Chmielus, M. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas-and water-atomized alloy 625 powders. Acta Materialia, 124, 280-289.
- Mouritz, A. P. (2012). Introduction to aerospace materials. Elsevier.

- Myers, K., Cortes, P., Conner, B., Wagner, T., Hetzel, B., & Peters, K. M. (2015). Structure property relationship of metal matrix syntactic foams manufactured by a binder jet printing process. *Additive Manufacturing*, 5, 54-59.
- Myers, K., Juhasz, M., Cortes, P., & Conner, B. (2015). Mechanical modeling based on numerical homogenization of an Al₂O₃/Al composite manufactured via binder jet printing. *Computational Materials Science*, 108, 128-135.
- Nandwana, P., Elliott, A. M., Siddel, D., Merriman, A., Peter, W. H., & Babu, S. S. (2017). Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges☆. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(4), 207-218.
- Nastac, M., Lucas, R., & Klein, A. (2017). Microstructure and mechanical properties comparison of 316L parts produced by different additive manufacturing processes. *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication*, Austin, TX, USA, 7-9.
- ODTÜ, (2019). Erişim Tarihi: 1.10.2019 <https://merlab.metu.edu.tr/tr/helyum-piknometresi>
- Pranger, L. A., Nunnery, G. A., & Tannenbaum, R. (2012). Mechanism of the nanoparticle-catalyzed polymerization of furfuryl alcohol and the thermal and mechanical properties of the resulting nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1139-1146.
- Redwood, B., 2019. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. Erişim Tarihi: 10.10.2019. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>
- Ren, L., Zhou, X., Song, Z., Zhao, C., Liu, Q., Xue, J., & Li, X. (2017). Process parameter optimization of extrusion-based 3D metal printing utilizing PW-LDPE-SA binder system. *Materials*, 10(3), 305.
- Renishaw., 2017. Erişim Tarihi: 1.9.2019 <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>
- Rokosz, K., Hryniewicz, T., Raaen, S., & Valiček, J. (2015). SEM/EDX, XPS, corrosion and surface roughness characterization of AISI 316L SS after electrochemical treatment in concentrated HNO₃. *Tehnički vjesnik*, 22(1), 125-131.
- Sachs, E.M., Cima, M.J., Brecht, J.F., Khanuja, S., Yu, R.L., 1998. Ceramic Mold Finishing Techniques for Removing Powder, United States Patent, No: 5,814,161 dated 29.09.1998.
- Sachs E.M., Cima, M.J., Brecht, J.F., Khanuja, S., 2000. Ceramic Mold Finishing, United States Patent, No: 6,109,332 dated 29.08.2000.

- Santosa E. C., Shiomia M., Osakadaa K., Laoui T., 2006. "Rapid manufacturing of metal components by laser forming", *International Journal of Machine Tools Manufacture* 46, 1459–1468.
- Shellabear M., Nyrhilä O., 2004. "DMLS-Development history and state of the art", *Laser Assisted Netshape Engineering* 4, 21-24.
- SLM Solutions, 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://slm-solutions.com/>
- Stawarczyk, B., Özcan, M., Hallmann, L., Ender, A., Mehl, A., & Hammerlet, C. H. (2013). The effect of zirconia sintering temperature on flexural strength, grain size, and contrast ratio. *Clinical oral investigations*, 17(1), 269-274.
- Tang, Y., Zhou, Y., Hoff, T., Garon, M., & Zhao, Y. F. (2016). Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process. *Materials Science and Technology*, 32(7), 648-656.
- Taormina, G., Sciancalepore, C., Bondioli, F., & Messori, M. (2018). Special resins for stereolithography: In situ generation of silver nanoparticles. *Polymers*, 10(2), 212.
- Tuffile, C. D., Lemke, H., & Mack, P. E. (2016). U.S. Patent Application No. 15/014,637.
- Turker, M., Godlinski, D., & Petzoldt, F. (2008). Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Materials characterization*, 59(12), 1728-1735.
- Utela, B., Storti, D., Anderson, R., Ganter, M., 2008. A Review of Process Development Steps for New Material Systems in Three Dimensional Printing (3DP), *Journal of Manufacturing Processes* 10, 96-104.
- Vangapally, S., Agarwal, K., Sheldon, A., & Cai, S. (2017). Effect of Lattice Design and Process Parameters on Dimensional and Mechanical Properties of Binder Jet Additively Manufactured Stainless Steel 316 for Bone Scaffolds. *Procedia Manufacturing*, 10, 750-759.
- Vijay K., Venkatesh V., Nandini V., 2013. "Direct Metal Laser Sintering: A Digitised Metal Casting Technology", *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, 13(4), 389-392.
- Wang, Y. X., Tan, S. H., Jiang, D. L., & Zhang, X. Y. (2003). Preparation of porous carbon derived from mixtures of furfuryl resin and glycol with controlled pore size distribution. *Carbon*, 41(11), 2065-2072.
- Wikipedia, 2019a. Erişim Tarihi: 18.10.2019 https://en.wikipedia.org/wiki/Isopropyl_alcohol

Wikipedia, 2019b. Erişim Tarihi: 18.10.2019 https://en.wikipedia.org/wiki/P-Toluenesulfonic_acid

Wikipedia, 2019c. Erişim Tarihi: 18.10.2019 https://en.wikipedia.org/wiki/Furfuryl_alcohol

XJet, 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://xjet3d.com>

Yin, X., Travitzky, N., & Greil, P. (2007). Near-Net-Shape Fabrication of Ti3AlC2-Based Composites. International journal of applied ceramic technology, 4(2), 184-190.

Zietala, M., Durejko, T., Polański, M., Kunce, I., Płociński, T., Zieliński, W., ... & Bojar, Z. (2016). The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. Materials Science and Engineering: A, 677, 1-10.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mert GÜRGEN

Doğum Yeri ve Yılı : Maltepe, 1993

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : mertgurgen@sdu.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise : Isparta Süleyman Demirel Fen Lisesi, 2011

Lisans : Gazi Üni., Mühendislik Fak., Makine Mühendisliği, 2016

Mesleki Deneyim

SDÜ Makine Mühendisliği Bölümü

04.2018-Halen

Yayınlar

Bardakçı, Y.S., Gürgen, M., Kayacan, M.C., 2018. Ergiyik Biriktirme Yöntemiyle İmal Edilen Eklemeli İmalat Parçalarının Boyutsal Doğruluğunun Araştırılması, 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry